INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES DE LA CIENCIA
N.º 434
NOVIEMBRE 2012

NÚMERO MONOGRÁFICO

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Noviembre 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Más allá de los Límites de la Ciencia

La naturaleza humana nos impulsa a explorar todo tipo de límites, sean estos evolutivos, tecnológicos o filosóficos



6,50 EUROS

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Noviembre 2012, Número 434





6

36



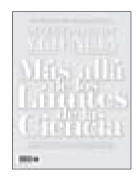
91

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

En ciencia, los límites no demarcan la frontera entre lo permitido y lo prohibido, sino entre lo que sabemos y lo que ignoramos. Constituyen, por tanto, un excelente punto de referencia para saber hacia dónde dirigir nuestros esfuerzos. Este número rinde homenaje a una de las aspiraciones más humanas que existen: trascender las fronteras de lo cotidiano.



redaccion@investigacionyciencia.es



Julio y Agosto 2012

SIMPLIFICACIÓN BAYESIANA

En «Árboles, bucles y la nueva física» [Investigación y Ciencia, julio de 2012], Zvi Bern, Lance J. Dixon y David A. Kosower describen el método unitario, un procedimiento para calcular procesos en física de partículas que, según los autores, resultaría menos laborioso que los habituales diagramas de Feynman. La técnica, sin embargo, no parece nueva. Aplicar estimaciones de probabilidades a los sucesos iniciales de una cadena causal de acontecimientos para determinar la probabilidad del resultado final (con los ajustes pertinentes a medida que se van obteniendo nuevos datos) ¿no se corresponde acaso con el teorema de Bayes?

Duncan Byers
Norfolk, Virginia

Responden los autores: *Las cantidades de interés podrían manipularse como sugiere Byers si en verdad representasen probabilidades. Sin embargo, tal y como aclarábamos en el artículo, dichos términos corresponden en realidad a la raíz cuadrada de una probabilidad. Se trata de números complejos (no reales) cuya combinación requiere aplicar las reglas de la mecánica cuántica, en las que la fase compleja asociada desempeña un papel fundamental. Gracias a ella aparecen los fenómenos de interferencia cuántica, lo cual impide aplicar a esas cantidades las reglas usuales del cálculo probabilístico. Otro obstáculo que impide multiplicar sin más los resultados asociadas a los diagramas de Feynman radica en las contribuciones espurias que también describíamos en el artículo, las cuales imposibilitan una interpretación probabilística de cada uno de los diagramas por separado.*

Existen algunas aproximaciones útiles en las que los términos de interferencia pueden despreciarse. En tales casos, el producto secuencial de probabilidades puede implementarse con éxito en los códigos informáticos que los físicos experimentales de partículas emplean a menudo, gracias a lo cual se logran resultados razonablemente realistas. Sin embargo, dichas aproximaciones resultan en general menos precisas que el método unitario. La búsqueda de métodos para combinar las virtudes de cada una de estas dos técnicas constituye un área de investigación muy activa en la actualidad.

MISTERIO ESTELAR

En «Super supernovas» [Investigación y Ciencia, agosto de 2012], Avishay Gal-Yam explica los procesos mediante los cuales las estrellas muy masivas (antaño consideradas incapaces de explotar) pueden originar las supernovas más potentes y duraderas jamás observadas.

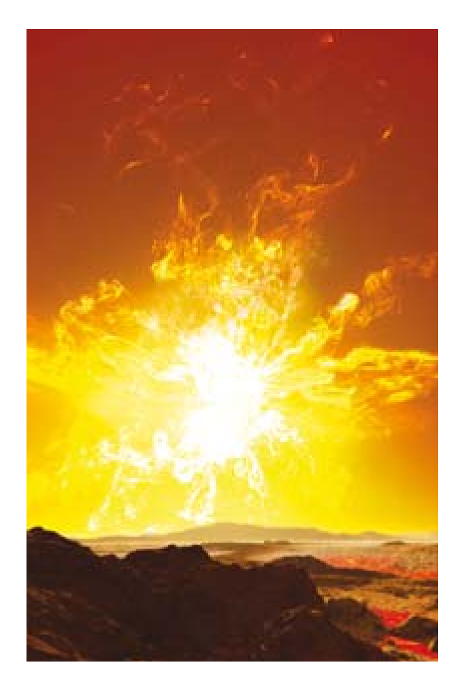
Según el autor, cuando la radiación gamma presente en el núcleo del astro comienza a convertirse en pares electrón-positrón, la presión de radiación que sostenía la estrella disminuiría de manera brusca, lo cual desencadenaría el colapso del astro. Sin embargo, el autor no aclara qué ocurre con esos positrones. ¿No podrían volver a combinarse con los electrones, generar nuevos rayos gamma y restablecer así la presión en el núcleo?

Por otra parte, ¿poseen los rayos gamma emitidos en una reacción electrón-positrón una longitud de onda característica y detectable?

David Smith

Responde Gal-Yam: *En efecto. Los positrones producidos en el núcleo de la estrella acaban colisionando con los electrones y, al aniquilarse, generan rayos gamma con una energía aproximadamente igual a la masa de tales partículas. No obstante, dicha reacción tarda algún tiempo en producirse, por lo que, en cualquier instante posterior, la energía (que antes era transportada solo por los fotones) se repartirá entre una cierta cantidad de fotones (que ejercen presión) y pares electrón-positrón (que no lo hacen). De esta manera, la presión total disminuye, el núcleo se contrae y el proceso continúa.*

Los rayos gamma producidos por la aniquilación mutua de electrones y positrones poseen una energía característica de unos 511 kiloelectronvoltios. Estos fotones, sin embargo, resultan inobservables, ya que la envoltura de la estrella no es transparente al paso de dicha radiación. A medida que interaccionan con los electrones e iones presentes en las capas exteriores del astro, los rayos gamma se van convirtiendo en fotones de menor energía. Antes o después, estos si podrán observarse en forma de luz ordinaria.



CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

BIOLOGÍA

Implantación del embrión en la fecundación in vitro



Fecundación de un óvulo por un espermatozoide.

El éxito cada vez mayor de la fecundación in vitro se debe sobre todo a los avances médicos realizados en el desarrollo y selección de los embriones. Sin embargo, al transferirlos al seno de una mujer, solo una pequeña parte de los embriones logran implantarse en el endometrio, la capa interna del útero. La causa de ello reside esencialmente en la incapacidad de evaluar si el endometrio está listo para recibir el embrión, afirma Steven L. Young, catedrático de obstetricia y ginecología de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Si no lo está, los embriones no se implantarán, de forma similar a como las semillas tampoco crecen en tierra inapropiada.

Se sabe que el endometrio experimenta cambios drásticos durante el ciclo menstrual y solo se halla preparado para la implantación del embrión durante un corto período de tiempo, unos días después de la ovulación. Pero aún no se ha descubierto un método fiable para determinar el momento preciso en que el útero está listo para aceptar un valioso embrión.

Varios estudios en curso están empezando a proporcionar respuestas. Linda Giudice y sus colaboradores, de la Universidad de California en San Francisco, han utilizado el análisis genómico para identificar un grupo de genes que se activan y desactivan en distintas fases del ciclo menstrual. Nicholas S. Macklon, catedrático de obstetricia y ginecología de la Universidad de Southampton, ha descubierto que el contenido proteico del líquido endometrial varía en función de si se encuentra en una etapa receptiva o no. Si estos resultados fueran refrendados por los ensayos clínicos, se podría desarrollar una prueba de laboratorio que determinara de forma inmediata si una paciente está lista o no para la transferencia de los embriones.

Aún faltan años para que ese tipo de pruebas y tratamientos lleguen a aplicarse, pero al igual que se trata de un gran desafío, también será enorme la posible recompensa. Si se conocieran los procesos moleculares que predicen cuándo es posible la implantación de un embrión, señala Macklon, se transformaría el diagnóstico y el tratamiento de la infertilidad.

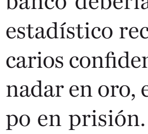
—Oscar Berlanga

¿QUÉ ES ESTO?



Gusanos osteófagos: En fecha reciente, los expertos han descubierto el método por el que ciertos gusanos marinos carentes de boca perforan los esqueletos de ballena. *Osedax*, que aparece en la fotografía junto a la costilla de una ballena en el lecho marino del californiano cañón de Monterrey, secreta ácido a través de sus extensiones radiculares, según los resultados presentados en el congreso anual de la Sociedad de Biología Experimental al comienzo de este verano. «Conocer la manera en que *Osedax* utiliza ácido para disolver la matriz ósea constituye el primer paso para entender cómo se alimenta», señala Greg Rouse, del Instituto Oceanográfico Scripps y miembro del equipo que efectuó el descubrimiento. Estos moradores de esqueletos de ballena fueron descubiertos hace unos diez años. *—Ann Chin*

DAVID M. PHILLIPS, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*óvulo*); CORTESÍA DE GREG ROUSE, INSTITUCIÓN OCEANOGRÁFICA SCRIPPS (*Osedax*)



ESTADÍSTICA

¿Merece la pena?

Quienes estén pensando en atracar un banco deberían tomar nota: un análisis estadístico reciente basado en datos bancarios confidenciales sugiere que, más que nadar en oro, el futuro les depara un tiempo en prisión.

«Los ingresos que se obtienen en un atraco típico a un banco resultan francamente pobres», sentencia un artículo que analiza los robos a bancos en el Reino Unido y que apareció en el número de junio de *Significance*, una revista bimestral de estadística publicada por la Asociación Americana de Estadística y la Real Sociedad de Estadística del Reino Unido. Para conseguir los datos necesarios, los economistas Neil Rickman y Robert Witt, de la Universidad de Surrey, y Barry Reilly, de la Universidad de Sussex, hubieron de negociar durante meses con la Asociación Británica de Banqueros antes de acceder a los registros confidenciales que detallaban las características de 364 robos a bancos perpetrados en el Reino Unido entre 2005 y 2008.

Las estadísticas indican que el robo medio a un banco en ese país es cometido por 1,6 ladrones. Cada atraco recaudaría unos 31.900 dólares, con una desviación estándar de 84.000 dólares. Si suponemos un reparto a partes iguales, cada delincuente obtendría unos 19.900 dólares de media por asalto, el salario anual de un camarero.

Llevar un arma de fuego eleva en unos 16.100 dólares el monto medio, el cual también se incrementa cuando se cuenta con la ayuda de cómplices. Sin embargo, los atracos en solitario aumentan los beneficios del asaltante, ya que las ganancias extra obtenidas gracias a la ayuda de secuaces no compensan el posterior reparto.

Si bien tampoco se trata de calderilla, apunta Rickman, en los cálculos habría que incluir los riesgos que supone atracar un banco. En el 33 por ciento de los robos consumados en el Reino Unido, los ladrones no consiguieron llevarse nada. Además, el 20 por ciento de los asaltos acaba en la captura de los responsables. La probabilidad de ser arrestado aumenta en caso de reincidir: al cuarto atraco, por ejemplo, las posibilidades de ser detenido ascienden al 59 por ciento. «Creía que la mayoría de los atracadores conseguirían mejores resultados», reconoce Rickman.

Giovanni Mastrobuoni, economista del Colegio Carlo Alberto de la Universidad de Turín, critica que el artículo no especifique las cifras correspondientes a los atracadores profesionales, quienes probablemente amasaron la mayor parte de los 11,6 millones de dólares robados en los bancos británicos entre 2005 y 2008. El artículo sugiere que las pantallas antibalas de activación rápida con las que cuentan algunas oficinas reducen el éxito del atraco en un tercio. «Sin embargo, cabe pensar que son los ladrones poco duchos quienes acaban atracando sucursales provistas de esas pantallas, mientras que los profesionales probablemente estudian al detalle las características del banco antes del atraco», explica Mastrobuoni. Rickman replica que esa información resulta aún más difícil de obtener, puesto que requiere tener acceso a registros policiales y bancarios confidenciales. Su estudio, opinan los economistas, subraya la necesidad de disponer de una información mejor y más detallada sobre los atracos a bancos.

—Dave Mosher



¡Arriba las manos! Bonnie Parker y Clyde Barrow (Bonnie y Clyde) en 1932.

REDUX PICTURES (*Bonnie y Clyde*); KIMIKAT PRODUCTIONS (*fotograma del cortometraje* That which once was)

AGENDA

CONFERENCIAS

7 de noviembre
Olor a mar. Siguiendo el azufre desde el plancton microbiano hasta el sistema climático
Rafel Simó, Instituto de Ciencias del Mar
Instituto de Química Orgánica General
Madrid
www.iqog.csic.es

22 de noviembre
¿Qué sabemos de los neandertales?
Antonio Rosas, Museo Nacional de Ciencias Naturales
Museo de la Alfarería
Mota del Cuervo (Cuenca)
www.ciudadciencia.es/agenda

EXPOSICIONES

A partir del 14 de noviembre
GEOflaix! Una mirada alternativa a los objetos cotidianos
Universidad de Barcelona
www.ub.edu/entornsweb/geoflaix

Bosques de mañana: la gestión de hoy
Casa de las Ciencias
Logroño
casadelasciencias.logro-o.org

OTROS

Del 5 al 11 de noviembre
Festival Internacional de Cine de Medioambiente
Universidad de Barcelona
www.ficma.com



14 y 21 de noviembre - Seminario para el profesorado
¿Qué estudia la ciencia de materiales?
Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, Bellaterra
www.icmab.csic.es

16 de noviembre - Jornada
IX Avances en ecología
Centro de Estudios Avanzados de Blanes
www.ceab.csic.es

Del 6 al 9 de diciembre
XX Congreso estatal de astronomía
Universidad Politécnica de Valencia
Gandía
www.congresoastronomia.es



AGRICULTURA

La revolución de los garbanzos

Etiopía es una isla de relativa calma en una región muy volátil. El año pasado, la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) pidió una expansión de la economía de Etiopía y un aumento del rendimiento de sus cosechas, como forma de mejorar la estabilidad en África Oriental.

La agencia se centró en un cultivo esencial: el garbanzo (*Cicer arietinum*), muy apreciado como ingrediente del hummus o en complementos nutritivos para las regiones que sufren hambrunas. También constituye un cultivo relativamente sostenible: actúa como fertilizante natural, al fijar el nitrógeno en el suelo, y requiere menos agua que otros cultivos populares, como el cereal africano tef.

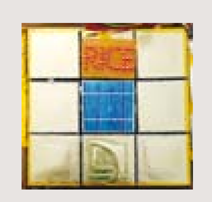
Etiopía ya era el mayor productor de garbanzos de África, pero los investigadores querían desarrollar semillas más eficientes. En agosto de 2006, en el *Journal of Semi-Arid Tropical Agricultural Research*, un grupo del Instituto Internacional de Investigación sobre Cultivos de los Trópicos Semiáridos (ICRISAT) identificó rasgos favorables en más de 20.000 variaciones del código genético del garbanzo. Ello permitía cultivar plantas que madurasen más rápido y presentasen mayor resistencia a la sequía y a las enfermedades. En lugar de utilizar herramientas biotecnológicas, se aplicaron técnicas tradicionales de hibridación de vegetales, que son eficaces y presentan un coste asumible. Los científicos del ICRISAT están empleando las mismas técnicas en diversos países en desarrollo. Tanzania, Sudán, Kenia, Myanmar y la India se están beneficiando de ellas en cultivos como el garbanzo, el guandú, el cacahuete, el mijo perla y el sorgo.

Las semillas mejoradas del garbanzo ya han marcado una diferencia sustancial: la cosecha de la legumbre en Etiopía aumentó un 15 por ciento entre marzo de 2010 y marzo de 2012. Los agricultores venden garbanzos enteros y secos a los mercados locales, los cuales vuelven a venderlos como tentempiés o los muelen para convertirlos en harina. Un mercado de exportación en crecimiento compra la cosecha para satisfacer la creciente demanda de hummus. El año pasado, PepsiCo, una de las propietarias de Sabra, empresa fabricante de hummus, colaboró con USAID y con el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas para mejorar el acceso de los agricultores etíopes a semillas más productivas y a prácticas agrícolas sostenibles, como el riego por goteo. Timothy Durgan, del Programa de Crecimiento Agrícola de USAID, afirma: «Unas mejores prácticas agrícolas deberían permitir que Etiopía aumente las exportaciones, además de satisfacer la demanda local».

—Aishwarya Nukala

INGENIERÍA

Paleta de baterías



Quizás algún día vayamos a la ferretería a comprar pintura catódica. El pasado mes de junio, un grupo de investigadores de la Universidad Rice y de la Universidad Católica de Lovaina anunciaron un nuevo diseño de batería que puede extenderse como si se tratase de pintura. Este adelanto técnico, descrito en la revista electrónica *Scientific Reports*, podría cambiar la forma en la que se fabrican las baterías y eliminar las restricciones relativas a las superficies utilizadas para almacenar energía.

El invento consta de cinco capas: un colector de corriente positiva, un cátodo para atraer a los iones con carga positiva, un separador de iones, un ánodo para atraer a los iones negativos y un colector de corriente negativa. Para cada capa, el reto consistía en idear una forma de mezclar el material conductor con varios polímeros, de tal modo que el resultado fuese una pintura que pudiera extenderse, capa a capa, sobre superficies diversas.

Los investigadores aplicaron la pintura a baldosas cerámicas, vidrio, una película transparente y flexible, acero inoxidable y al lateral de una jarra de cerveza. Después, conectaron pequeños circuitos a las baterías. En uno de los experimentos, conectaron una placa solar a una de las baterías y activaron con ello un indicador LED. El producto aún no está listo para su comercialización, pues la capa de separación de los electrolitos es inestable en presencia de oxígeno: explota al entrar en contacto con el aire, por lo que los investigadores aún deberán mejorar el diseño.

Neelam Singh, miembro del equipo de la Universidad Rice, señala que ahora intentarán disminuir la reactividad de los materiales y hacerlos más respetuosos con el entorno. Añade que otros grupos están intentando crear una pintura similar, pero para obtener placas solares. En tal caso, tendríamos «placas solares en forma de pintura sobre baterías en forma de pintura», explica Singh. Con ello, las paredes de las casas podrían convertirse en dispositivos de captura y almacenamiento de energía solar.

—Evelyn Lamb

UFUK ZIVANA, ISTOCKPHOTO (*garbanzos*); CORTESÍA DE JEFF FITLOW, UNIVERSIDAD RICE (*pintura catódica*)

NEUROCIENCIA

Pienso, luego deletreo

Los avances en neurociencia e ingeniería informática están derivando en nuevas formas de ayudar a comunicarse a aquellos que no pueden hablar o que sufren problemas de movilidad. Buena parte de las nuevas técnicas se basan en herramientas informáticas para analizar la actividad cerebral de los sujetos y convertirla en letras u otros símbolos. En un estudio publicado en línea en la revista *Current Biology* el pasado mes de junio, Bettina Sorger, de la Universidad de Maastricht, y sus colaboradores enseñaron a seis adultos sanos a responder a diversas preguntas seleccionando con la mente las letras que aparecían en una pantalla.

Desde el interior de un escáner de resonancia magnética funcional, que mide los cambios de flujo sanguíneo en el cerebro, los voluntarios miraban una pantalla que mostraba las letras del alfabeto y una barra espaciadora, todo ello organizado en filas y columnas. Cada una de las tres filas se hallaba emparejada con una de tres tareas mentales: una de imaginación motriz (como trazar escaleras o flores con la mente), otra de cálculo mental (en la que los sujetos repasaban las tablas de multiplicar) y una tercera de habla mental (recitar en silencio un poema o una oración). En cada momento, se resaltaba un bloque de letras en la pantalla. Para elegir una letra en concreto, los participantes esperaban a que la pantalla resaltase esa letra y realizaban la tarea mental asociada a la fila correspondiente. El programa informático, que no podía leer los pensamientos de los voluntarios, pero sí distinguir entre los distintos tipos de actividad cerebral, consiguió un 82 por ciento de aciertos.

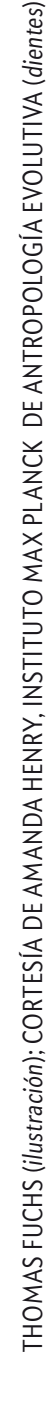
Aunque el estudio de Sorger no supone más que una prueba de concepto, el nuevo programa augura un complemento prometedor para un conjunto creciente de técnicas similares. Niels Birbaumer, de la Universidad de Tubinga, ha creado un «dispositivo traductor de pensamientos», el cual permite que un individuo con problemas de movilidad deletree palabras y elija pictogramas a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo. John Donoghue, de la Universidad Brown, y sus colaboradores enseñaron a un hombre paralizado a abrir su correo electrónico y a jugar al Pong, un videojuego, moviendo un cursor con la mente.

Otros investigadores también han creado interfaces cerebro-ordenador que permiten a un tetrapléjico escribir con la mente una o dos palabras por minuto en una pantalla, así como dispositivos que convierten el pensamiento en sonidos vocálicos pronunciados por un sintetizador de voz. Sorger considera que el programa informático que sus colaboradores y ella han desarrollado podría complementar esas técnicas y espera perfeccionarlo en los próximos años. «Incluso si una sola persona se beneficiase de nuestro trabajo, habría merecido la pena», concluye.

—Ferris Jabr

PALEONTOLOGÍA

Detectives de dientes



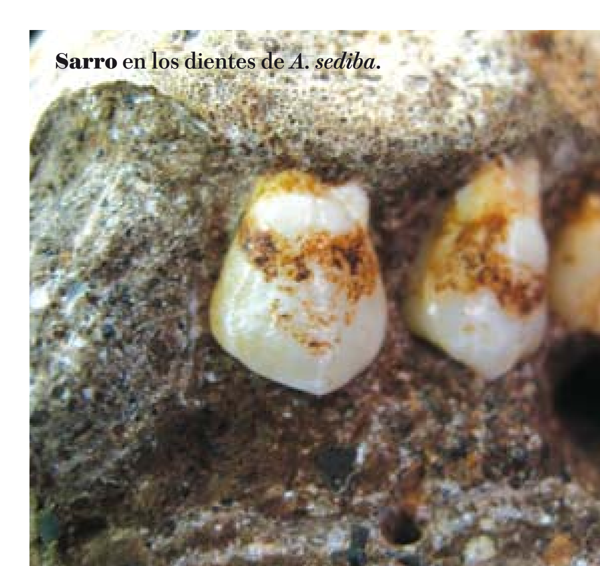
Un descubrimiento reciente ha hecho centrar la atención de los investigadores en el sarro, los depósitos que el dentista elimina de los dientes cuando uno acude a que le haga una limpieza dental. Excepto que, en este caso, se trata del sarro que se acumula en unos dientes de casi dos millones de años de antigüedad. Pertenecen a *Australopithecus sediba*, uno de los candidatos a ancestros de nuestro género, *Homo*. Hasta ahora nunca se había hallado sarro en un hominino primitivo (perteneciente a la línea evolutiva que dio lugar a los seres humanos, tras la separación de la línea que originó los chimpancés). El análisis del sarro prehistórico ha arrojado datos sorprendentes sobre la alimentación de *A. sediba*.

En un artículo publicado en julio en la revista *Nature*, Amanda Henry, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, Lee Berger, de la Universidad de Witwatersrand en Johannesburgo, y sus colaboradores han descrito el sarro, las propiedades químicas de los dientes y las marcas de desgaste correspondientes a una hembra adulta y a un macho joven, cuyos restos se hallaron en una excavación a las afueras de Johannesburgo. Las características químicas de los dientes indicaron que, a lo largo de su vida, se alimentaron principalmente de árboles y arbustos (o, tal vez, de animales que consumieron árboles y arbustos). Lo cual resulta sorprendente, porque otros homininos de antigüedad similar preferían las hierbas tropicales y plantas ciperáceas.

El análisis del sarro reveló restos de alimentos vegetales que nadie creía que formasen parte de la dieta de nuestros ancestros, como la corteza de árbol. Berger señala que numerosos primates utilizan la corteza como un alimento de emergencia en épocas de escasez. Sugiere que quizás estos homininos, cuyos restos se encontraron en lo que fue una profunda caverna subterránea, habrían acabado allí sus días debido a una sequía que les empujó a intentar acceder a una laguna en su interior [*véase* «El origen del género *Homo*», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, junio de 2012]. Los indicios de corteza en el sarro podrían hacer ese escenario más verosímil.

Tradicionalmente se pensaba que el género *Homo* se había adaptado a las condiciones ambientales cambiantes, que favorecían la ocupación de las sabanas y la incorporación de carne en su dieta. *A. sediba* tenía dientes pequeños, lo que se asocia a un aumento de alimentos de mayor calidad, como la carne, y manos más diestras, que le habrían permitido fabricar herramientas. ¿Comía realmente carne *A. sediba*? Berger explica que, con los datos que se están recopilando, se podrá dar una respuesta a estas preguntas.

—Kate Wong



Sarro en los dientes de *A. sediba*.

PALEONTOLOGÍA

Viajero del tiempo

El artista Charles R. Knight recurrió a su vasta experiencia en la representación de animales vivos para insuflar vida a seres prehistóricos. Este ejercicio le hizo tomar conciencia del carácter irreversible de la extinción

Tal vez el lector ignore su nombre, pero puede que sí conozca su obra. Charles R. Knight, (1874-1953), nacido en Brooklyn, produjo frescos y esculturas de dinosaurios, mamuts y humanos prehistóricos que adornan los grandes museos estadounidenses de historia natural. Sus dinosaurios han sido plasmados en juguetes, sellos de correos o historias gráficas, así como en libros y revistas científicas de paleontología. Uno de los ilustradores de *Sir* Arthur Conan Doyle los plagió para su novela *El mundo perdido*, de 1916. Algunos llegaron incluso a convertirse en estrellas de la pantalla, sirviendo directamente de inspiración en secuencias de *King Kong* (1933) y, no tan directamente, en *Fantasía*, de Walt Disney (1940), o *Parque Jurásico*, de Steven Spielberg (1993). Ray Harryhausen, maestro de animación de monstruos hollywoodenses, creador de los dinosaurios de *Hace un millón de años* (1966) y otros clásicos, basó sus personajes de animación por paso de manivela (*stop motion*) en dibujos y esculturas de Knight.

Aunque deba casi toda su fama a representaciones de bestias extintas hace mucho, Knight fue ante todo y sobre todo pintor de la fauna silvestre, aspecto de su carrera al que no se ha hecho la debida justicia. En el curso de su vida llegó a crear casi 1000 retratos de animales vivos de 800 especies, una producción tan prodigiosa que asombra. Sus reconstrucciones prehistóricas se beneficiaron de años de atenta observación y detallados estudios anatómicos de animales modernos. Los retratos de leones, tigres, leopardos nivales y gatos domésticos, tomados directamente de modelos vivos, perfilaron su representación de un tigre esmilodonte defendiendo su presa contra un buitre gigante, similar a un cóndor, en los pozos de alquitrán de La Brea, en Los Ángeles. Sus bocetos de elefantes de zoológico le prepararon para infundir vida a lanudos mamuts cruzando parajes nevados en la Francia de la Edad de Hielo.

Durante la preparación de mi nuevo libro *Charles R. Knight: The artist who saw through time*, observé en las obras y escritos de Knight un subtexto que anteriormente había sido pasado por alto. Decenios de estudio de huesos fósiles con el paleontólogo Henry Fairfield Osborn, su mentor científico en el Museo Americano de Historia Natural de la ciudad de Nueva York, dejaron en Knight una honda huella y un agudo sentido de lo irrevocable de la extinción. Le obsesionaba la idea de que todas sus amadas especies animales estuvieran condenadas a desaparecer, y que los humanos, ahora, aceleraran en gran manera ese proceso. Ya en vida de Knight, el bisonte americano, antaño sobreabundante, había sido masacrado hasta casi el exterminio. En 1901, el Gobierno estadounidense hizo de esta especie un icono, al incluir un dibujo de Knight de un bisonte macho en un sello de correos y en el billete de 10 dólares.

Knight llegó a considerar a cada una de las especies vivas como un tesoro irreemplazable. Cuando los individuos se volvían escasos, como el ejemplar único de paloma migratoria (*Ectopistes migratorius*), muerto en 1914 en el zoológico de Cincinnati, se apresuraba a esbozarlos, un amoroso homenaje y despedida del artista al ser querido. Sus simpatías, empero, no alcanzaban a los tiranosaurios. En su libro *Life Through the Ages*, de 1946, escribió que los carnosaurios (grupo que incluye a los tiranosaurios) «se han extinguido hace mucho, y quizá no haya sido mala cosa, porque jamás han hollado la superficie de esta tierra seres más siniestros».

Quedé asombrado al saber que Knight sufrió ceguera durante gran parte de su vida adulta, irónica veleidad del destino en un artista cuyas imágenes tanta influencia han tenido. Pintaba al óleo pequeños bocetos, muy detallados, a unos centímetros de sus ojos, que sus ayudantes transcribían luego minuciosamente a las paredes del museo. Por último, se subía al andamio y añadía los toques finales. Cuando alzaba la mirada a un mural terminado, ya se tratase de un duelo de dinosaurios, de gigantescos perezosos terrestres o de armadillos, todo le resultaba borroso. Aun así, nunca cejó en su empeño.

Tanto ansiaba que el público pudiera experimentar, aunque fuera en su fantasía, el «mundo perdido» que tantas veces había visitado en su imaginación, que propuso la creación de un parque temático lleno de estatuas de dinosaurios a tamaño natural. Por desgracia, este no llegó a materializarse durante su vida por falta de un patrocinador.

Su sueño, no obstante, se hizo realidad a los diez años de su muerte, gracias al amigo y colaborador Louis Paul Jonas, taxidermista y escultor de animales de gran talento. Jonas obtuvo fondos de Sinclair Oil y modeló en fibra de vidrio nueve esculturas de dinosaurios, entre ellas un «brontosaurio/apatosaurio» de 21 metros de largo para la Feria Mundial de Nueva York de 1964. Millares de visitantes se introdujeron en ese mundo prehistórico como si atravesaran uno de los murales de Knight: un merecido homenaje para un valeroso artista que se enfrentó a la oscuridad y a la extinción sin más armas que arcilla, escayola y pintura, [*véase* «El arte pictórico de Charles R. Knight», por Gregory S. Paul; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1996.]

—*Richard Milner*
Museo Americano de Historia Natural
Ciudad de Nueva York



Grabado que realizó el artista de un ejemplar de paloma migratoria, poco antes de que la especie se extinguiera.







CORTESÍA DEL MUSEO FIELD, CK 9T (*arriba*); © BIBLIOTECA DEL MUSEO AMERICANO DE HISTORIA NATURAL (*centro y abajo*)

Charles R. Knight es famoso como precursor del paleoarte. Destaca su icónica plasmación del enfrentamiento entre un *T. rex* y un *Triceratops*, de 1927 (*arriba*), o la representación de un tigre esmilodonte defendiendo su presa contra un *Teratornis* oportunista en los pozos de alquitrán de La Brea en Los Ángeles (*abajo*). Pero sobre todo pintaba la fauna salvaje, como se observa en el dibujo recién descubierto de un leopardo de las nieves, de 1904 (*centro*).

FÍSICA

Objetivos y oportunidades de la simulación cuántica

Los simuladores cuánticos albergan promesas de gran calado, pero el campo precisa objetivos claros a corto plazo

En 1956, durante un encuentro de la Sociedad Americana de Física, Richard Feynman impartió una conferencia que llevaba por título «Hay mucho sitio al fondo». Aquel seminario es hoy ampliamente reconocido como una de las principales fuentes de inspiración en el desarrollo de la nanotecnología. En él, Feynman también anticipó las posibilidades que la mecánica cuántica nos brinda para estudiar el mundo microscópico: «Cuando llegamos al mundo de lo muy, muy pequeño, nos encontramos con todo tipo de fenómenos que representan oportunidades completamente nuevas en lo que se refiere al diseño. A pequeña escala, el comportamiento de los átomos no se parece en nada a lo que observamos a gran escala, pues estos satisfacen las leyes de la mecánica cuántica. Así, a medida que descendemos y jugueteamos con los átomos, estamos operando con otras leyes, por lo que podemos esperar hacer cosas diferentes».

El campo de la información cuántica explora esas nuevas posibilidades e intenta explotar las leyes de la mecánica cuántica, entre las que se incluye el principio de superposición, para realizar tareas computacionales con una eficiencia mayor que la que exhiben los dispositivos gobernados por la física clásica. El progreso experimental logrado durante las últimas décadas ha sido extraordinario. Nos ha permitido aislar partículas microscópicas una a una, manipular y controlar sus estados cuánticos internos, así como detectarlas con una fidelidad casi perfecta. Pero, a pesar de tales avances, el ordenador cuántico supone aún un objetivo a largo plazo, pues requiere el control total de un sistema cuántico de muchos cuerpos y, en último término, la implementación de refinados protocolos de corrección de errores que aseguren la tolerancia ante los fallos. Pero, aunque un procesador cuántico funcional aún se haga esperar, ¿sería posible aprovechar los avances experimentales conseguidos hasta ahora para construir un dispositivo que, sin llegar al nivel de complejidad de un ordenador cuántico, realice algunas de las tareas que resultan imposibles para un aparato clásico?

Cuanto por cuanto

La respuesta bien podría hallarse en otra de las conferencias visionarias de Feynman. En su charla de 1981 «Simular la física con ordenadores», el físico subrayaba la dificultad que entraña simular sistemas cuánticos por medio de ordenadores clásicos. La potencia computacional necesaria para siquiera describir un sistema cuántico aumenta de manera exponencial con el número de constituyentes. Para describir el estado cuántico (puro) más general de N partículas de espín 1/2, necesitamos almacenar 2^N coeficientes; una tarea que, en la práctica, deviene casi imposible si N es mucho mayor que 50. Más aún: para predecir el valor de una cantidad física, necesitaremos sumar, multiplicar o combinar de una forma u otra todos esos coeficientes, lo que requerirá un tiempo de cómputo que crece también de manera exponencial con N. Feynman defendía que, para superar tales problemas, deberían emplearse «simuladores cuánticos» que operasen según las leyes de la mecánica cuántica. Si dispusiéramos de un sistema compuesto, a su vez, de partículas de espín 1/2 manipulables a voluntad, podríamos diseñar la interacción entre tales partículas de acuerdo con la que queremos simular y, de esa manera, predecir el valor de las cantidades físicas sin más que efectuar las medidas adecuadas en nuestro sistema.

Para construir un simulador cuántico, Feynman proponía tratar el espacio y el tiempo como cantidades discretas. El problema en cuestión queda especificado por un hamiltoniano, $H(t)$ (una cantidad que describe las interacciones —en principio, dependientes del tiempo— entre las partículas en un retículo), un estado inicial, $|\Psi(0)\rangle$, y un instante final, t. Con estos datos, el objetivo consiste en determinar ciertas propiedades físicas del estado final, $|\Psi(t)\rangle$.

En 1996, Seth Lloyd demostró que la evolución a pequeños «saltos» temporales permitiría simular de manera eficiente cualquier hamiltoniano cuántico de muchos cuerpos que describiese interacciones entre pocas partículas. Aquí *eficiente* quiere decir que el tiempo necesario para la simulación no crecería de forma exponencial con el número de partículas, sino polinómica. La idea principal consiste en aproximar cada paso de tiempo por una secuencia de operaciones más simples de acuerdo con la llamada descomposición de Trotter, lo que resulta en una sucesión de puertas cuánticas. Cabe destacar que una simulación cuántica nos permitiría determinar no solo el comportamiento dinámico de un sistema cuántico de muchos cuerpos, sino también (mediante algoritmos adiabáticos) propiedades a temperatura cero, correspondientes al estado fundamental de un hamiltoniano dado.

Materia real

Feynman imaginó que el simulador cuántico sería «una máquina cuántica que podría imitar cualquier sistema cuántico, incluido el mundo físico». Un aparato tan general sería tan difícil de construir como un ordenador cuántico. Sin embargo, si rebajamos nuestras pretensiones y nos conformamos con un dispositivo que imite algunos sistemas físicos de interés, pero que no puedan simularse con ordenadores clásicos, quizás el proyecto se antoje más sencillo. Después de todo, semejante artilugio aún gozaría de enorme importancia científica y técnica. La mayoría de las veces no perseguimos una representación fiel de la función de onda completa de muchos cuerpos, sino que nos interesan solo algunas de sus propiedades físicas, relacionadas por lo general con cantidades intensivas (como densidades, magnetización por sitio de la red o correlaciones de pocos cuerpos) que, a su vez, determinan el diagrama de fases.

Además, se espera que un simulador cuántico se muestre más robusto frente a las imperfecciones que un ordenador cuántico, lo que nos permitiría obviar el paso correspondiente a la corrección de errores. En líneas generales, es cierto que si uno de los puntos de la red sufre una

perturbación indeseada, los valores esperados de las cantidades intensivas se verán alterados. Sin embargo, siempre que la red sea lo suficientemente grande, dichas perturbaciones no excederán un pequeño porcentaje. De hecho, en una gran cantidad de materiales que nos gustaría imitar con dicho simulador, tales imperfecciones aparecen de manera natural; con todo, las fases se muestran robustas frente a ellas.

Aunque la versión de Feynman constituye un simulador cuántico digital con una evolución temporal «estroboscópica», cabe considerar también simulaciones analógicas, en las que el hamiltoniano $H(t)$ se construya directamente con un sistema físico que evolucione de forma continua en el tiempo. Un simulador cuántico digital goza de una versatilidad mayor, puesto que puede simular un abanico más amplio de hamiltonianos (podremos simular directamente interacciones de N cuerpos; o, si el dispositivo es capaz de simular H_1 y H_2, también reproducirá el sistema descrito por $H_1 + H_2$). Por su parte, los simuladores analógicos quizá resulten menos propensos a sufrir errores, ya que sortean aquellos relacionados con la descomposición de Trotter. Además, permitirían considerar simulaciones en un espacio continuo, más allá de las confinadas a una red discreta.

Con un ojo en la recompensa

Como hemos subrayado, el objetivo principal de un simulador cuántico consiste en resolver problemas inabordables con un ordenador clásico. Entre ellos se incluyen los sistemas cuánticos de muchos cuerpos, con un gran número de grados de libertad y con entrelazamiento a gran escala. Es cierto que, hoy en día, no pocos de tales problemas pueden resolverse o simularse con ordenadores clásicos, gracias a un elenco de métodos computacionales muy potentes (como el método de Montecarlo, el de grupos acoplados —*coupled cluster*—, la teoría del funcional de densidad, la del campo medio dinámico, o el grupo de renormalización de la matriz densidad). Sin embargo, existen clases enteras de problemas de muchos cuerpos que no se dejan tratar con tales procedimientos.

La primera de ellas incluye sistemas de fermiones o espines frustrados en dos o más dimensiones espaciales (donde, entre otras razones, los métodos de Montecarlo se ven limitados por el «problema del signo»). La segunda es de carácter dinámico y comprende la mayoría de los modelos que carecen de solución exacta para tiempos muy largos, entre los cuales podemos hallar tanto sistemas aislados como abiertos (aquellos que, en contacto con algún tipo de baño térmico con múltiples grados de libertad, exhiben procesos disipativos).

Resulta muy difícil, si no imposible, demostrar que un problema dado no puede simularse de manera eficiente con un ordenador clásico —para el que siempre podrían existir algoritmos aún desconocidos—, pero que, en cambio, sí se dejaría tratar con un simulador cuántico. Quienes trabajan en la teoría de la complejidad computacional llevan largo tiempo buscando ese tipo de demostraciones,



MICHAEL VENTURA/ALAMY

Grandes oportunidades: Richard Feynman (aquí durante una clase en 1970) se percató hace ya tiempo de las posibilidades que entrañaba la manipulación de la materia a nivel atómico. En 1981 propuso la idea de simular un sistema cuántico con otro, un proyecto que comienza a convertirse en una realidad experimental.

hasta ahora sin éxito. Durante el último año, sin embargo, las investigaciones que intentan conjugar información cuántica, física de la materia condensada y teoría cuántica de campos parecen sugerir que los problemas que más se beneficiarán de un tratamiento cuántico son aquellos con una cantidad considerable de entrelazamiento. Aunque en equilibrio térmico el grado de entrelazamiento no puede ser arbitrariamente elevado (debido a la llamada «ley del área»), esa posibilidad sí existe en problemas dinámicos. De hecho, una situación alejada del equilibrio exhibirá, por lo general, una cantidad considerable de entrelazamiento. En tales casos, un simulador cuántico debería resultar de especial utilidad.

Problemas como los mencionados aparecen en una variedad de disciplinas, como en física de la materia condensada, mecánica estadística cuántica, física de altas energías, física atómica o química cuántica. Un ejemplo notable nos lo proporciona la superconductividad a altas temperaturas. ¿Qué interacción básica entre los electrones origina el comportamiento superconductor? O, en otras palabras, ¿cuál es el hamiltoniano mínimo que describe la superconductividad a altas temperaturas? Ante semejante pregunta, un simulador cuántico podría investigar varios hamiltonianos posibles y comprobar si aparecen o no las fases relevantes.

Un simulador cuántico no solo se convertiría en una herramienta de enorme valor para afrontar problemas concretos en los campos mencionados, sino que se revelaría como un poderoso instrumento para asistir al desarrollo, puesta a prueba y comparación de métodos teóricos. Por ejemplo, existen muy pocas técnicas teóricas que describan la evolución temporal de un sistema de muchos cuerpos tras un cambio súbito de las interacciones, incluso en el caso unidimensional. De hecho, es aún una pregunta abierta si tal sistema alcanzará el equilibrio térmico, en el sentido de si el estado reducido de una pequeña subred conexa podría evolucionar hacia algo semejante al estado reducido de un estado global en equilibrio térmico (en este caso, al tratarse de un sistema cerrado, la red en su conjunto no puede evolucionar hasta alcanzar el equilibrio térmico). Un simulador cuántico no solo constituiría un paso clave para responder a esta pregunta, sino que, además, debería guiar el desarrollo de nuevas técnicas numéricas para afrontar el problema. Por último, la simulación cuántica nos permitiría crear sistemas con excitaciones exóticas interesantes en sí mismas, como las que la jerga científica ha dado en llamar *cualquierones* (o *anyons*, cuasipartículas cuyo comportamiento varía de manera continua entre el de un bosón y un fermión), las cuales desempeñan un papel central en computación cuántica topológica.

El camino hacia un simulador cuántico

Llegados a este punto, podemos intentar concretar y extraer un conjunto de requisitos que debería satisfacer un simulador cuántico. Desde luego, dada la enorme variedad de simulaciones posibles, resulta impracticable elaborar una lista concisa que las incluya todas. Pero, ya que nos hemos interesado en aquellas que superen a los dispositivos clásicos, nos centraremos en las aplicables a los sistemas cuánticos de muchos cuerpos.

Sistema cuántico. Un simulador cuántico debería poseer un sistema de bosones, fermiones, o ambos, con o sin grados de libertad internos (pseudoespín). Las partículas se encontrarían almacenadas en una red o, al menos, confinadas en una región del espacio. El sistema debería contener un gran número de grados de libertad.

Inicialización. Un simulador cuántico debería poder preparar (de manera aproximada) un estado cuántico conocido. En un caso ideal, este sería un estado puro, aunque en determinadas situaciones podría resultar de interés estudiar la dinámica de un estado mezcla (por ejemplo, un estado térmico).

Diseño de hamiltonianos. Debería resultar posible diseñar un conjunto de

interacciones, con campos externos o entre diferentes partículas, con parámetros ajustables. Tales interacciones pueden ser locales (entre partículas vecinas) o de mayor alcance. Podrían también incorporar un baño térmico cuando se requiriese simular sistemas abiertos. Entre los hamiltonianos (o liouvillianos, en el caso de sistemas abiertos) accesibles debería existir alguno que no pudiese simularse de manera eficiente mediante técnicas clásicas.

Detección. Debería resultar posible realizar medidas sobre el sistema. Estas podrían ser individuales, de modo que únicamente afectasen a unos pocos sitios de la red, o colectivas. En un caso ideal, sería posible realizar experimentos «de un único paso» que pudiesen repetirse varias veces. Por ejemplo, al medir la magnetización colectiva en un conjunto de espines a lo largo de una determinada dirección, correspondiente a un observable S, deberíamos poder determinar no solo $\langle S \rangle$, sino también $\langle f(S) \rangle$, donde f denota una función arbitraria.

Verificación. Si el problema en cuestión no puede simularse por medios clásicos, careceremos de un método para comprobar el grado de fiabilidad de la simulación. Sin embargo, deberíamos disponer de algún procedimiento que nos permitiese aumentar nuestra confianza en el resultado. Por ejemplo, el simulador podría evaluarse en primer lugar con problemas de solución conocida. Asimismo, la evolución podría realizarse hacia delante y hacia atrás en el tiempo, a fin de comprobar que finaliza en el estado inicial. Cuando se ejecuta un algoritmo adiabático, la técnica puede utilizarse para ajustar el tiempo de la simulación por medio de variaciones repetidas de los parámetros, de manera que nos acerquemos cada vez más al hamiltoniano que deseamos obtener. También podrían compararse los resultados de las simulaciones correspondientes a varios métodos y sistemas.

Existen diversas propuestas teóricas para construir simuladores cuánticos con un propósito específico en varias clases de sistemas. No nos extenderemos aquí en sus aspectos prácticos. Aparte de los retos experimentales que conlleva su construcción, este campo de investigación emergente alberga no pocas cuestiones teóricas de gran interés. Por ejemplo, hemos argumentado que un simulador cuántico debería mostrar una mayor inmunidad a la decoherencia que un ordenador cuántico, al menos en lo que se refiera a determinados observables, o, más aún, si solo deseamos identificar las fases correspondientes a diferentes valores de los parámetros externos que gobiernan el hamiltoniano.

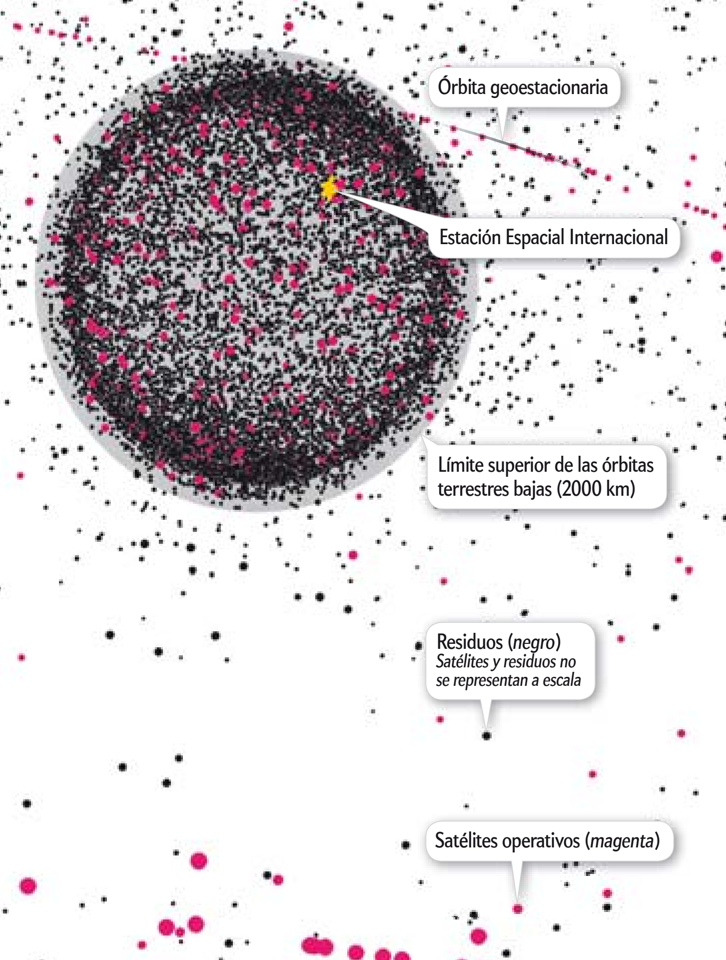
¿Podemos aventurar una afirmación más rigurosa en este sentido? Lloyd demostró que un sistema cuántico puede simular de manera eficiente la dinámica de otro mediante un cambio estroboscópico de los parámetros. Pero ¿cuán propenso a los errores se revela este procedimiento? Los sistemas clásicos caóticos son difíciles de simular —incluso por medios clásicos— debido a su característica sensibilidad exponencial. Podemos plantearnos una cuestión análoga para ciertos sistemas cuánticos no integrables de muchos cuerpos. Otra pregunta de interés concierne a la forma de alcanzar el estado fundamental del hamiltoniano del problema, o un estado térmico. Para el primero, pueden emplearse algoritmos adiabáticos. Estos quizá resulten de utilidad en determinadas situaciones, pero hacen falta nuevas ideas para asegurar e identificar la adiabaticidad. Por otro lado, ¿cómo determinar para qué tipo de hamiltonianos puede hallarse con eficiencia el estado fundamental (es decir, en un tiempo que aumente de manera «suave» con el número de partículas o de nodos en la red)? De hecho, este es justo el tipo de problema que interesa a los informáticos teóricos cuando estudian la complejidad de los problemas cuánticos.

La simulación cuántica constituye un campo apasionante que encierra grandes promesas para el futuro. Pero los objetivos a corto plazo deberían quedar definidos con claridad. Como uno de tales objetivos, proponemos encontrar sistemas que satisfagan los criterios expuestos y, en particular, demostrar en el laboratorio la simulación de un sistema cuántico de muchos cuerpos en el que intervenga un entrelazamiento a gran escala (ya demostrado) que no pueda representarse con medios clásicos. Esto convertiría en realidad la idea de Feynman.

—*J. Ignacio Cirac*
Instituto Max Planck de Óptica Cuántica
Garching

—*Peter Zoller*
Instituto de Física Teórica
Universidad de Innsbruck

Artículo original publicado en *Nature Physics*, vol. 8, págs. 264-266, abril de 2012.



EXPLORACIÓN ESPACIAL

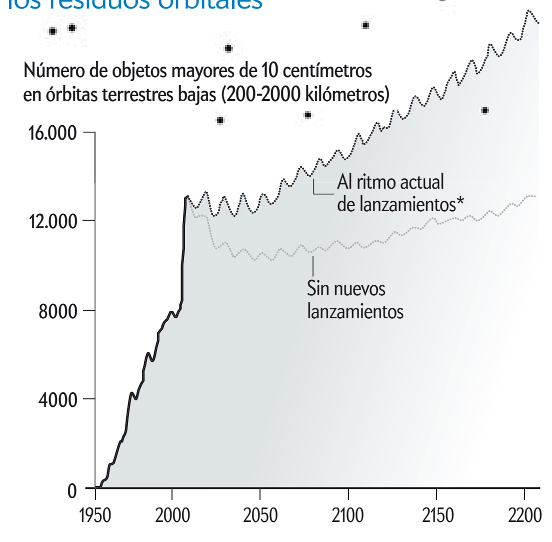
El vertedero de la era espacial

No se avista una solución a corto plazo para el problema de los residuos orbitales

Puede que el espacio sea inconmensurable, pero las inmediaciones de nuestro pequeño planeta se encuentran repletas de basura. Cohetes usados, naves espaciales inservibles, fragmentos de satélites y todo tipo de materiales han engendrado una nube de residuos que amenaza a satélites y astronautas. En la actualidad hay catalogados más de 16.000 objetos con un tamaño superior a los 10 centímetros, la mayoría de ellos en órbitas terrestres bajas, entre 200 y 2000 kilómetros de altitud.

Aunque a partir de hoy cesara toda actividad espacial, la chatarra que ya se encuentra en órbita continuaría colisionando y fragmentándose durante siglos. Al ritmo actual de lanzamientos el problema no hará sino empeorar. La prueba de un arma antisatélites que China ejecutó en 2007 y una colisión entre satélites de EE.UU. y Rusia en 2009 han disparado el número de objetos acumulados durante el último lustro. Los Gobiernos convienen en la necesidad de implementar medidas de limpieza, pero los expertos aún han de hallar una solución viable.

—John Matson



* *Supone una conformidad del 90 por ciento con las políticas de contención de residuos*

GRÁFICO DE JAN WILLEM TULP; FUENTES: TING WANG, UNIVERSIDAD STANFORD (*datos de residuos de 2012*); J.-C. LIOU, OFICINA DEL PROGRAMA DE DESECHOS ORBITALES DE LA NASA (*previsiones*)



NUEVA WEB

www.investigacionyciencia.es

FUENTE DE INFORMACIÓN DE REFERENCIA
Más de 10.000 artículos elaborados por científicos expertos.

ORGANIZACIÓN TEMÁTICA
Consulte todos los contenidos de la página web organizados por materias científicas.

BUSCADOR REFINADO
Obtenga resultados más precisos con los nuevos filtros de búsqueda.

HEMEROTECA DIGITAL
Acceda a todas nuestras revistas digitalizadas en pdf.

ARTÍCULOS INDIVIDUALES
Consulte el artículo que le interese, sin necesidad de abrir la revista entera.

ACTUALIDAD CIENTÍFICA
Reseñas de trabajos científicos actuales elaboradas por nuestro equipo editorial.

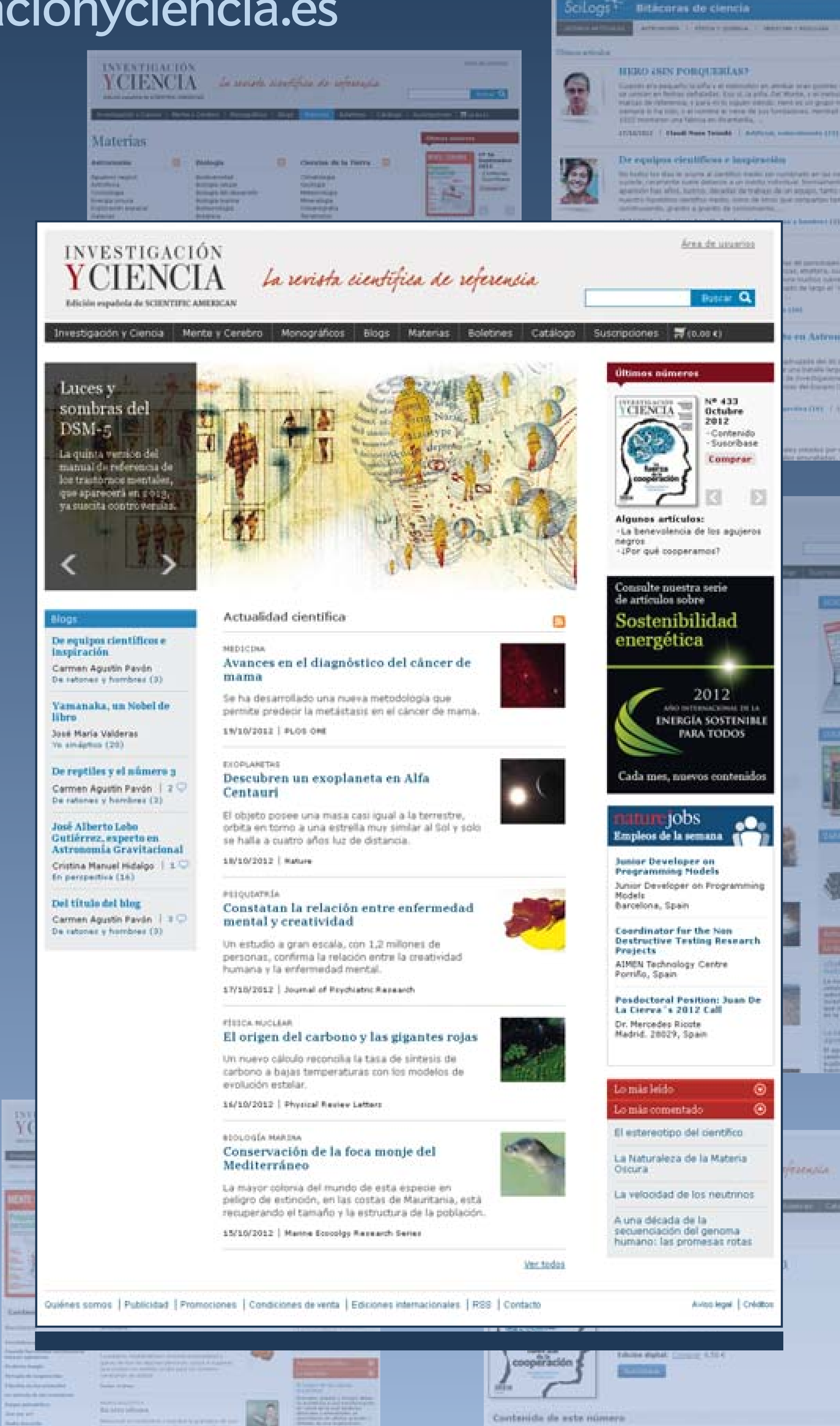
SCILOGS
Nuevas bitácoras de ciencia, dirigidas por investigadores expertos.

NUEVAS SUSCRIPCIONES
Acceda a todas nuestras publicaciones en el formato que le resulte más cómodo (papel, digital o ambos).

BOLETINES TEMÁTICOS
Reciba gratis selecciones periódicas de todos nuestros contenidos sobre una materia determinada: medicina y salud, energía y medioambiente, astronomía...

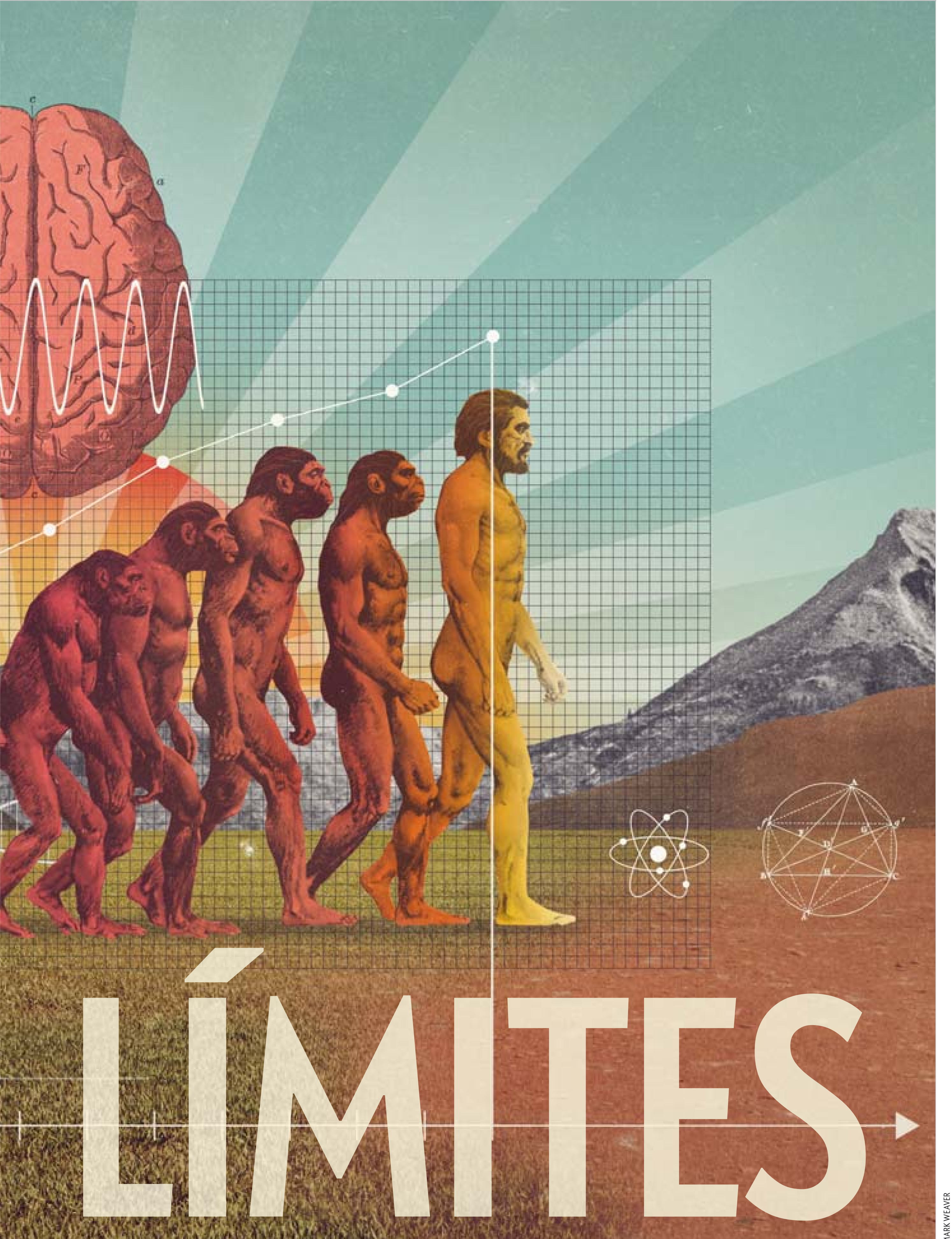
REDES SOCIALES
Comparta nuestros contenidos en Facebook y Twitter.

SINDICACIÓN DE CONTENIDOS
Artículos, notícias, blogs...



Bajo el impulso de la evolución apareció, no hace mucho, el ser humano, un animal diestro en la caza y la recolección, dotado de una capacidad intelectual sin límites. Desde entonces, nuestro camino nos ha llevado hasta el umbral del mayor misterio de la naturaleza. ¿Quiénes somos? ¿Qué podemos hacer? ¿Adónde nos dirigimos?

MÁS ALLÁ DE LOS



MARK WEAVER

EVOLUCIÓN

Superhumanidad

Las ansias por superar nuestros límites evolutivos nos diferencian del resto de los animales

Robert M. Sapolsky



Si entablamos una conversación sobre la naturaleza humana con un antropólogo, seguramente nos recordará que el 99 por ciento de nuestra historia transcurrió en las sabanas, donde los humanos formábamos grupos de cazadores y recolectores. Puede tratarse de un cliché repetido por los científicos, pero no deja de ser cierto. De hecho, durante esos millones de años se produjeron algunos de nuestros avances más destacados, como la locomoción bípeda y el desarrollo de un cerebro de gran tamaño. Por descontado, esas innovaciones evolutivas tan útiles tuvieron un precio, como los dolores habituales en la espalda provocados por el bipedismo o los problemas existenciales que conlleva la reflexión sobre uno mismo, favorecida por una corteza cerebral enorme. Como sucede a menudo en la evolución, nada es gratuito.

Para complicar la situación, el mundo que hemos creado —no hace mucho, si tenemos en cuenta nuestra trayectoria— es totalmente distinto al que se habían adaptado nuestro cuerpo y nuestra mente. En vez de tener que ir a cazar la comida, esta viene hacia nosotros gracias al servicio de pizzería a domicilio. E interaccionamos con nuestros seres queridos y cercanos a través de Facebook, en lugar de pasar la mayor parte del día con ellos. Pero aquí acaba la utilidad del cliché de los antropólogos para explicar la condición humana.

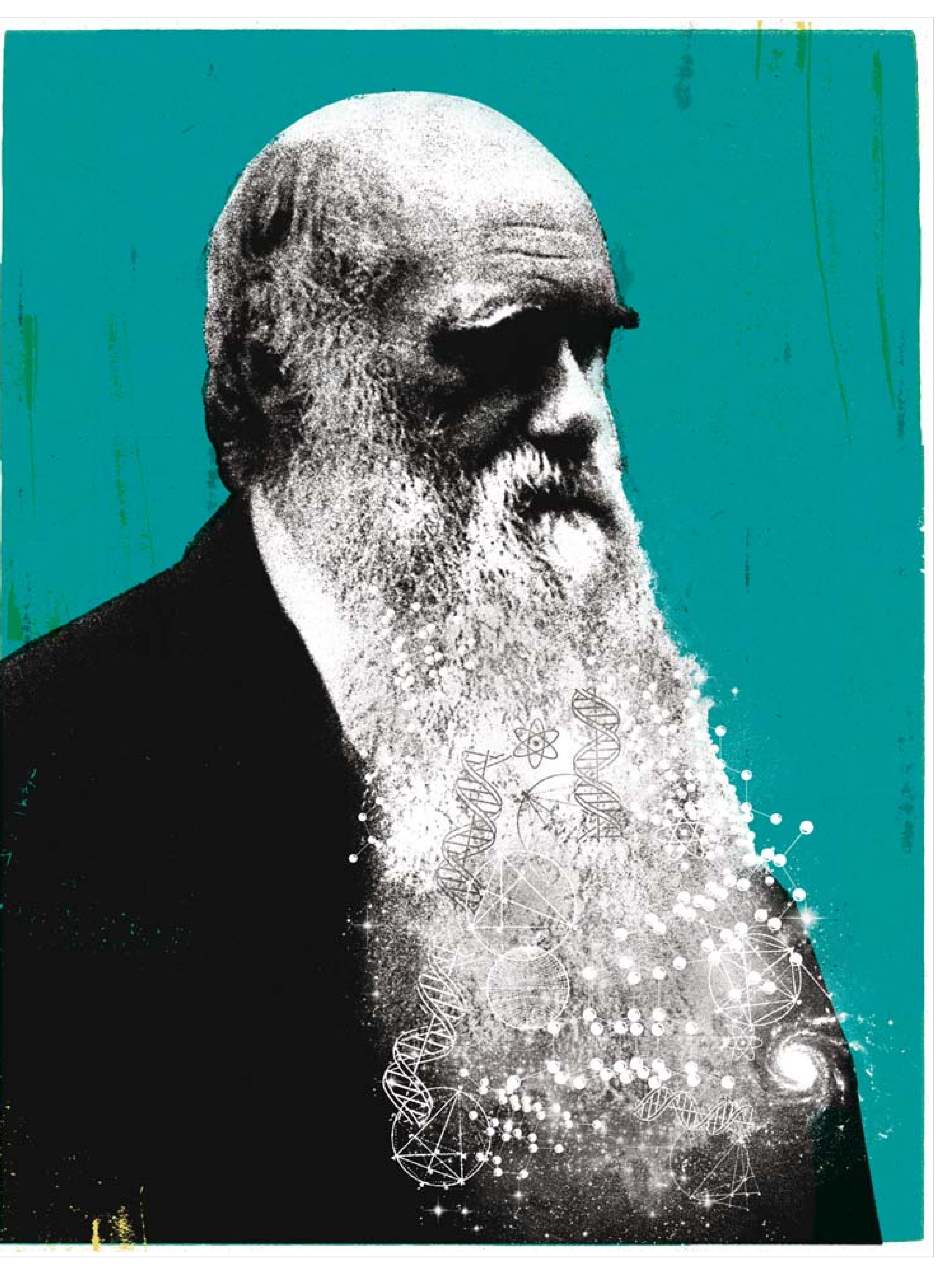
El origen de las diferencias entre el entorno en el que evolucionamos y las situaciones a las que nos enfrentamos en la era moderna deriva de otra característica propia de los humanos, quizá la más importante. Nuestra propensión a ir más allá de las limitaciones impuestas por la evolución nos ha llevado a crear instrumentos para ser más rápidos, más listos y vivir más tiempo. La ciencia constituye uno de esos instrumentos que nos aleja de nuestro modo de pensar arcaico —ver para creer— y nos permite hacer frente a los retos de hoy, ya sea una gripe pandémica o el cambio climático. Podríamos afirmar que la última expresión de la singularidad humana nos hace aspirar a ser mejor de lo que somos.

PECULIARIDADES HUMANAS

Para entender la forma en que la selección natural nos ha moldeado hasta convertirnos en una especie única entre los primates, debemos regresar a la sabana ancestral. Ese entorno abierto difería considerablemente del medio forestal que habitaban nuestros antepasados simios. Por una parte, el sol de la sabana resultaba abrasador; por otra, las plantas nutritivas escaseaban. Con el fin de adaptarse a esa situación, nuestros predecesores perdieron el pelo corporal para mantener el cuerpo fresco. También dejaron de consumir vegetales duros y pasaron a comer la carne de los herbívoros de las sabanas, con lo que sus molares se redujeron. La superficie de masticación disminuyó en tal medida que hoy se han vuelto casi inútiles.

Mientras tanto, la dificultad para obtener alimentos forjó el cuerpo de nuestros antepasados, que desarrolló una extraordinaria eficacia en el ahorro de calorías. La herencia de ese metabolismo nos ha llevado a los problemas de sobrealimentación actuales que han dado lugar a la extensión de la diabetes. Asimismo, el sistema inmunitario evolucionó en un mundo donde el encuentro con un portador de patógenos nuevos resultaba muy

HEADS OF STATE





Robert M. Sapolsky es profesor de biología y neurología en la Universidad Stanford. Su investigación se centra en el comportamiento de los papiones salvajes. Sapolsky ha escrito numerosos ensayos y libros sobre la condición humana.

EN SÍNTESIS

Muchos de los desafíos a los que nos enfrentamos en la actualidad se deben a las diferencias entre el ambiente al que se adaptaron nuestros antepasados y el mundo de hoy en día.

Pero esta incongruencia también es consecuencia de una característica singular de los humanos: nuestra propensión a ir más allá de los límites impuestos por la evolución.

La ciencia es uno de los instrumentos del que nos servimos los humanos para ampliar nuestras capacidades mentales y físicas.

infrecuente. Hoy en día, si una persona estornuda en el aeropuerto, el rinovirus que alberga en su interior puede viajar al otro extremo del mundo en menos de un día.

Cuando nos referimos al comportamiento, las peculiaridades humanas abundan. En numerosos aspectos, los humanos no encajamos en los estándares de los primates. Cabe mencionar un ejemplo de especial interés, en que las especies de primates siguen dos modelos de conducta. En el primero de ellos, los machos y las hembras forman parejas estables y duraderas que practican la monogamia social y sexual. Los machos contribuyen al cuidado de las crías, o incluso se hacen cargo por completo de ellas. Los dos sexos suelen presentar el mismo tamaño corporal y un aspecto similar. Los gibones y numerosas especies de monos sudamericanos siguen ese patrón. En el segundo modelo, los primates se muestran más competitivos y toman el camino opuesto. Las hembras cuidan por completo de las crías, mientras que los machos, de mayor tamaño, poseen un abanico de adornos corporales, como coloraciones faciales conspicuas o espaldas plateadas, y pasan una gran parte del tiempo exhibiéndose en acciones agresivas con otros machos. Los humanos no encajamos en ninguno de los dos modelos. Desde un punto de vista anatómico, fisiológico y genético, no somos ni animales monógamos ni competidores; nos hallamos en una posición intermedia y confusa entre ambos comportamientos.

Sin embargo, en otras conductas se nos puede considerar un primate de manual: somos extraordinariamente sociales y nuestra inteligencia más elaborada corresponde a la social. Los problemas matemáticos complejos de transitividad quizá nos apabullen, pero nos resulta muy fácil entender que si la persona A domina a B, y B domina a C, entonces C se mostrará sumiso y se postrará a los pies de A en cuanto aparezca. Captamos escenarios complejos de interacciones sociales y percibimos si un acuerdo ha sido violado (identificamos mejor al que miente que al que se muestra muy generoso). Y somos inigualables en nuestra capacidad para reconocer caras; de hecho, poseemos un área de la corteza cerebral especializada en ello, la circunvolución fusiforme.

Las ventajas selectivas de contar con un gran cerebro social resultan obvias. Nos permitió afinar nuestra capacidad de leer la mente de los otros, destacar en manipulación social y especializarnos en el engaño y la atracción de posibles parejas o seguidores. En Estados Unidos, una mayor inteligencia social en la juventud es una mejor garantía de éxito laboral en la edad adulta que una buena puntuación en las pruebas SAT de acceso a la universidad.

De hecho, los humanos sobresalen entre todos los primates en cuanto a inteligencia social. Según la hipótesis del cerebro social en los primates, existe una correlación entre la proporción del cerebro ocupada por la neocorteza y el tamaño social del grupo de una determinada especie. Tal correlación resulta más llamativa en los humanos (si se considera el tamaño del grupo en sociedades tradicionales) que en cualquier otra especie de primate. Es decir, la parte más distintiva de nuestro cerebro de primate evolucionó para satisfacer la necesidad de saber quién no se llevaba bien con quién, quién estaba cayendo en la jerarquía y qué pareja estaba metiéndose en líos cuando no debía.

Al igual que el cuerpo, nuestra mente y nuestro comportamiento, forjados en un pasado cazador y recolector, deben adaptarse hoy a un entorno muy distinto. Vivimos a miles de kilómetros de donde nacimos. Nos encontramos con más gente haciendo cola en una atracción de Disneylandia que la que conocerían nuestros antepasados en toda su vida. Incluso podemos mirar la fotografía de alguien y sentir deseos sin siquiera saber cómo huele —algo increíble para un mamífero.

MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES

Que vivamos en un mundo irreconocible para nuestros ancestros demuestra un hecho: nuestra idiosincrasia nos empuja a romper las barreras de nuestra propia naturaleza. No nos resulta extraño salir de nuestros límites. La ciencia es una de las creaciones humanas más novedosas y singulares en que ponemos a prueba nuestras restricciones de homínidos. Algunas de las formas más drásticas en que hemos transformado el mundo son producto directo de la ciencia, que nos proporciona ventajas obvias. Pensemos en los primeros genetistas, que se las ingeniaron para domesticar plantas y animales —un invento que revolucionó nuestra capacidad de obtener alimento pero que ahora amenaza los recursos naturales del planeta.

En un plano más abstracto, la ciencia pone a prueba nuestra percepción de lo que es normal o de lo que es mejor. Desafía nuestro sentido sobre lo que somos. Gracias a la ciencia, la esperanza de vida de los humanos sigue creciendo, la esta-

El procedimiento científico en sí mismo desafía nuestras limitaciones como homínidos

tura media aumenta, el coeficiente de inteligencia no deja de mejorar. Y también se van superando los distintos récords mundiales en deportes.

Mientras que la ciencia rompe barreras en esos ámbitos, sorprende lo poco que ha cambiado a los humanos. No importa cuán larga sea nuestra esperanza de vida; al final todos moriremos, seguirá habiendo una causa de muerte principal y continuaremos sintiendo que nuestros seres queridos se van demasiado pronto. Y aunque en término medio nos hayamos vuelto más listos, más altos o mejores deportistas, hay un problema: ¿a quién le importa el promedio? Como individuos, lo que queremos es superar a nuestros semejantes. Nuestro cerebro es injusto, ya que no deja de comparar y se interesa más por las diferencias que por los valores absolutos. Nuestros sistemas sensoriales no nos informan sobre la calidad de un estímulo, sino sobre su calidad con respecto a otros estímulos cercanos. Por ejemplo, la retina contiene células que no responden solo a un color; reaccionan ante un color en relación con otros que lo rodean (como el rojo contrapuesto al verde). Aunque todos deseamos ser listos, lo que queremos la mayoría es ser más listo que el vecino. Lo mismo se aplica a los atletas, y así surge una cuestión que sin duda tuvo importancia entre los homínidos: ¿cuán rápido he de correr para evadirme del león? La respuesta siempre es la misma: más que la persona que está a mi lado.

De todos modos, la mayoría de las veces la ciencia nos lleva más allá de nuestros límites cuando nos planteamos ciertas preguntas. En mi opinión, hay cuatro tipos de cuestiones. La primera guarda relación con la naturaleza asocial de la ciencia. No me refiero a las tareas que realizan los científicos en solitario hasta altas horas de la madrugada para finalizar un estudio, sino al interés que sienten por cuestiones inanimadas. Por supuesto, existen numerosas excepciones a esta afirmación, pero algunas disciplinas científicas tratan únicamente con problemas inanimados, como los astrofísicos que intentan descubrir planetas en otros sistemas solares. Con frecuencia la ciencia exige a nuestro cerebro social de homínido sentir pasión por algo inerte.

La ciencia amplía nuestros horizontes en una segunda forma. Cuando abordamos problemas como la mecánica cuántica, la nanotecnología, la física de partículas, nos obliga a creer en cosas que no podemos ver. Yo pasé años de mi carrera transvasando líquidos de un tubo de ensayo a otro, midiendo los niveles de hormonas o de neurotransmisores. Si me hubiese parado a reflexionar sobre ello, muy probablemente hubiese pensado que las hormonas y los neurotransmisores no existían.

Por el tipo de preguntas que puede generar, hay una tercera forma en que la ciencia nos lleva a sobrepasar nuestra credulidad de homínido. No tenemos parangón en el reino animal cuando se trata de recordar el pasado remoto o prever el futuro. Sin embargo, esas capacidades tienen un límite. Nuestros antepasados cazadores y recolectores tal vez recordaran lo que las abuelas les contaron sobre sus abuelas, así como lo sucedido en una o dos generaciones atrás. De una forma sin precedentes, la ciencia hace preguntarnos por procesos que suceden en períodos de tiempo muy largos. ¿Cuándo se producirá la próxima glaciación? ¿Cuándo volverá a reunirse el continente Gondwana? ¿Nos dominarán las cucarachas dentro de un millón de años?

Luchamos para superar la forma de percepción de nuestra mente de homínido, que nos dice que no puede haber procesos tan largos o que estos no pueden tener ningún interés. Igual que otros primates, valoramos muy poco lo que se halla alejado en el tiempo. Preferimos obtener ahora diez dólares o diez bolitas de comida que esperar a mañana para recibir once. Y en las pruebas que visualizan la actividad cerebral se observa una mayor liberación de dopamina en nuestro cerebro cuando se produce una recompensa inmediata.

Por último, hay preguntas científicas que rompen nuestros límites de una forma más profunda. Se trata de dilemas de impresionante abstracción: ¿somos libres? ¿Cómo funciona la consciencia? ¿Existe algo que no podamos conocer?

En ese tipo de cuestiones podríamos caer en la tentación de dar una respuesta fácil, de la misma forma en que nuestra mente paleolítica se lanzaba a meditar sobre los dioses. El problema estriba en la propensión de los humanos a crear dioses que se nos asemejan (en un ejemplo fascinante, las personas autistas religiosas suelen tener la imagen de un dios asocial, alguien preocupado por cosas como mantener unidos los átomos). Los humanos hemos inventado divinidades a lo largo de la historia, pero pocas de ellas poseían capacidad de abstracción. Por el contrario, la mayoría tenía apetencias bastante comunes. Ninguna deidad tradicional habría mostrado interés por conversar con Gödel sobre el conocimiento, o lanzar los dados con Einstein (o de no lanzarlos, como así fue). Preferían recibir el sacrificio del buey más grande o juguetear con el mayor número de ninfas del bosque.

El procedimiento científico en sí mismo desafía nuestras limitaciones como homínidos. Nos permite preguntarnos por cosas muy pequeñas, incluso invisibles, cosas que no podemos respirar o desplazar, o que se hallan muy alejadas de nosotros en el espacio y el tiempo. Nos llevan a preocuparnos sobre temas que habrían denigrado las creencias en Thor o Baal. La ciencia constituye una de nuestras mejores armas para cuestionarnos las ideas establecidas. La empresa de hacer, pensar y preocuparse por ella no es para cobardes. Pero, a pesar de todo, aquí estamos, reinventando nuestro mundo y esforzándonos por mejorar nuestra suerte planteándonos preguntas científicas a cada momento. Así es la naturaleza humana.

PARA SABER MÁS

Monkeyluv: And other essays on our lives as animals. Robert M. Sapolsky. Scribner, 2006.

Are humans just another primate? Conferencia grabada de Robert M. Sapolsky. **http://fora.tv/2011/02/15/Robert_Sapolsky_Are_Humans_Just_Another_Primate**

COGNICIÓN

¿Seremos cada vez más inteligentes?

El aumento constante del cociente intelectual de la población refleja la manera en que nuestras mentes se adaptan al mundo que estamos creando

Tim Folger

[redacted]



Hace 28 años, James R. Flynn, investigador de la Universidad de Otago, en Nueva Zelanda, descubrió un fenómeno para el que los sociólogos aún buscan una explicación: los resultados en las pruebas de cociente intelectual (CI) han venido mejorando sin cesar desde principios del siglo xx. Flynn examinó los tests de inteligencia de más de dos docenas de países y descubrió que las puntuaciones se incrementaban a razón de 0,3 puntos al año: tres puntos por decenio. Esta progresión, hoy conocida como *efecto Flynn*, ha sido confirmada tras casi 30 años de seguimiento en numerosos países. Las puntuaciones continúan en alza.

«Para mi sorpresa, el aumento prosigue aún en el siglo xxi», observa Flynn, cuyo último libro, *Are we getting smarter?* («¿Nos hacemos más inteligentes?», Cambridge University Press), fue publicado el pasado mes de septiembre. «Los datos más recientes indican que, en EE.UU., la progresión continúa al ritmo de tres décimas al año.»

Uno de los aspectos más insólitos del efecto es su inexorable monotonía. No se ralentiza; tampoco se detiene y vuelve a empezar. Progresa sin más, «como guiado por una mano invisible», sostiene Flynn. Joe Rodgers, psicólogo de la Universidad de Oklahoma, examinó los tests de inteligencia de casi 13.000 estudiantes estadounidenses para comprobar si podía aislar el efecto en escalas de tiempo más gruesas: «Nos preguntábamos si las puntuaciones de los estudiantes quizá mejoraban en períodos de cinco o diez años. Bien: mejoran en períodos de un año», asegura Rodgers. «El aumento aparece de manera sistemática año tras año. Los chicos nacidos en 1989 responden algo mejor que los nacidos en 1988.»

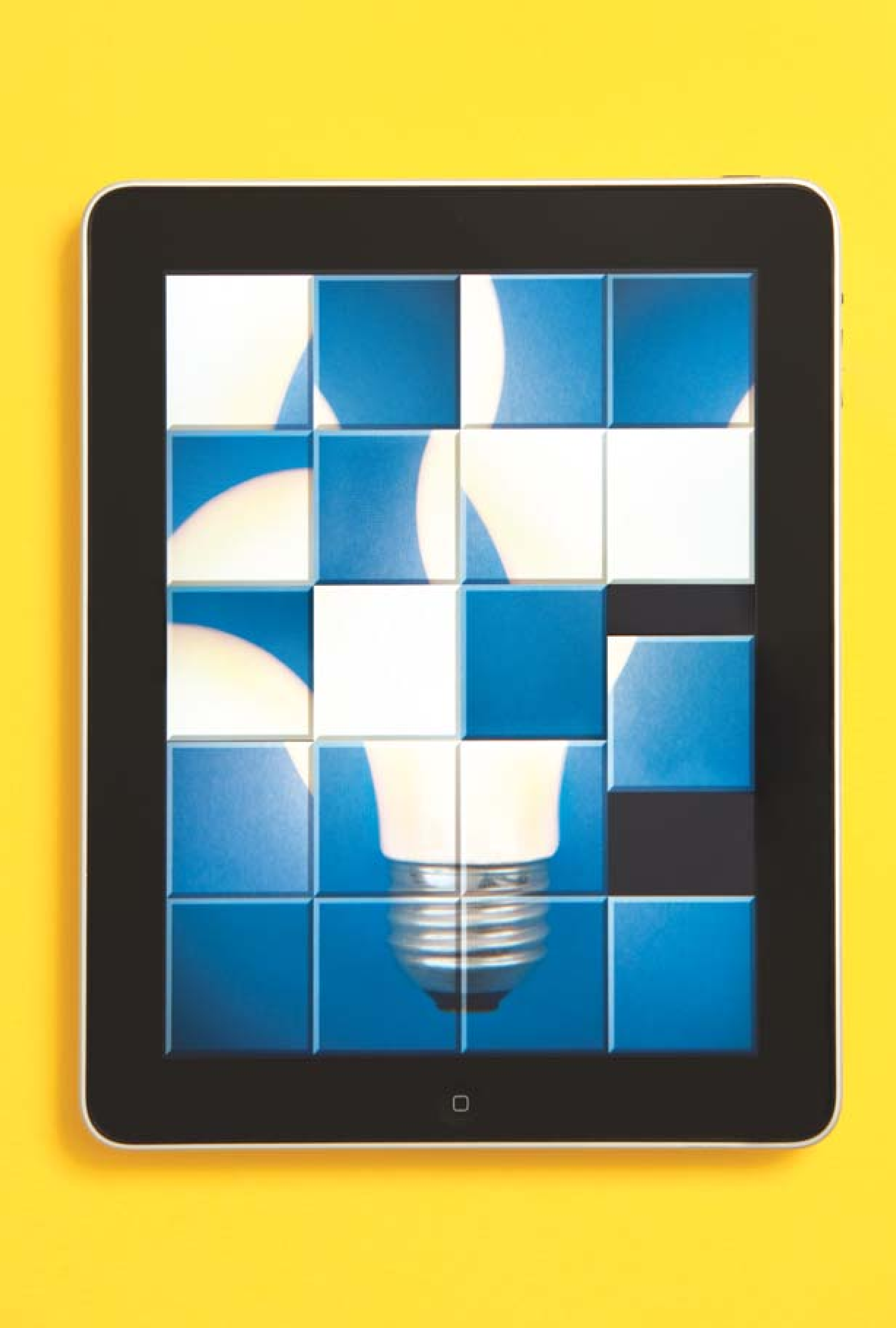
El efecto Flynn implica que, en promedio, un niño obtendrá en los tests de inteligencia unos 10 puntos más que sus padres a la misma edad. Por tanto, nuestros descendientes de finales de siglo nos llevarán una ventaja de unos 30 puntos, lo que según los criterios actuales correspondería a la diferencia entre una inteligencia media y la del 2 por ciento de los superdotados. Al menos, si el efecto Flynn continuase como hasta ahora. Pero ¿proseguirá la tendencia de manera indefinida, hacia una población llena de individuos que hoy consideraríamos genios, o existe algún límite natural a la inteligencia humana?

LA MENTE MODERNA

Poco después de admitir la realidad del efecto Flynn, se observó que el aumento del CI obedecía casi por completo a ciertas mejoras en partes muy concretas de algunos de los tests de inteligencia más comunes. Uno de ellos, la escala Wechsler de inteligencia infantil (WISC), consta de varias secciones, cada una de las cuales ha sido diseñada para evaluar unas destrezas u otras. Quizá cabría esperar que las mejoras se produjesen en los apartados relativos a la inteligencia cristalizada, aquella asociada a los conocimientos que se adquieren en la escuela. Sin embargo, algo así no sucede: los resultados relativos a la aritmética o al nivel de vocabulario se mantienen casi constantes a lo largo del tiempo.

La mayor parte del aumento observado en el CI procede de dos subpruebas, ambas dirigidas a evaluar la capacidad para el razonamiento abstracto. Una de ellas se ocupa de las semejanzas entre objetos y plantea preguntas como «¿en qué se parecen una naranja y una manzana?». Una respuesta del estilo «las dos son comestibles» puntúa menos que «ambas son

KEVIN VAN AELST







Tim Folger es periodista científico y coordinador de la serie *The best american science and nature writing* («Los mejores escritos estadounidenses sobre ciencia y naturaleza»), una antología anual publicada por Houghton Mifflin. Ha recibido varios premios a lo largo de su carrera.

EN SÍNTESIS

Las puntuaciones en los tests de inteligencia han venido aumentando sin cesar desde hace más de un siglo. El fenómeno se conoce como efecto Flynn.

Dicho incremento se observa en las pruebas que intentan medir los aspectos «no culturales» de la inteligencia, como el emparejamiento de figuras geométricas.

Se cree que el efecto obedece a la creciente capacidad de abstracción que exige vivir en una sociedad cada vez más tecnificada. El resultado es un bucle cuyo fin no se espera para dentro de poco.

frutas», pues esta última trasciende las propiedades físicas más simples. En la otra prueba se muestran varias figuras geométricas, las cuales guardan entre sí ciertas relaciones de carácter abstracto que el sujeto debe identificar.

Una de las paradojas del efecto Flynn reside en que dichos tests fueron diseñados para arrojar un resultado no verbal, e independiente de la cultura, de lo que los psicólogos denominan inteligencia fluida: la capacidad innata para resolver problemas con los que no estamos familiarizados. Sin embargo, el efecto Flynn demuestra que hay algo en el entorno que está ejerciendo, en las poblaciones de todo el mundo, una acusada influencia en ciertos aspectos de la inteligencia supuestamente ajenos a la cultura. Ainsley Mitchum y Mark Fox, psicólogos de la Universidad estatal de Florida que han estudiado con detalle las diferencias intergeneracionales en las puntuaciones de los tests de inteligencia, conjeturan que esta mejora del pensamiento abstracto podría estar vinculada a una mayor flexibilidad en nuestra manera de percibir los objetos que nos rodean.

«A todo el mundo le resulta familiar el "botón" de arranque en la pantalla de un ordenador, pero no es un botón de verdad», explica Mitchum. «Un día, al explicar a mi abuela cómo apagar el ordenador, le dije: "Pulsas con el ratón en el botón de arranque y seleccionas 'apagar'". Ella comenzó a golpear la pantalla con el ratón.» Mitchum aclara que su abuela no carece de inteligencia. Sin embargo, nació y se crió en un mundo en el que los botones eran pulsadores y en el que, desde luego, los teléfonos no eran cámaras fotográficas. Numerosos investigadores —Flynn entre ellos— sostienen que un aumento del CI no refleja un incremento de la potencia cerebral bruta. Más bien, el efecto Flynn indicaría cuán *modernas* se han hecho nuestras mentes. Pruebas como las mencionadas exigen reconocer categorías abstractas y establecer relaciones entre ellas. Y esa capacidad, sostiene Flynn, se ha revelado más útil en el siglo xx que en ningún otro momento de la historia.

«Quien no logra clasificar conceptos abstractos o no está habituado a servirse de la lógica no puede tener un verdadero dominio del mundo moderno», asegura Flynn. «En los años veinte del siglo pasado, el psicólogo soviético Alexander Luria realizó una serie de entrevistas maravillosas a campesinos de la Rusia rural. Les planteaba cuestiones como: "Donde siempre hay nieve, todos los osos son blancos. En el Polo Norte siempre hay nieve. ¿De qué color son los osos allí?". Los campesinos respondían que jamás habían visto osos que no fueran pardos. No consideraban que una pregunta hipotética tuviese sentido.» Aquellos campesinos no eran estúpidos, pero su mundo exigía otra clase de destrezas. «A mi parecer, el aspecto más fascinante de todo esto no reside en que obtengamos puntuaciones mucho más altas en las pruebas de CI, sino la nueva luz que ello arroja sobre lo que llamo historia de la mente en el siglo xx».

Una interpretación simplista del efecto Flynn conduce enseguida a conclusiones extrañas. Si extrapolásemos hacia atrás en el tiempo, obtendríamos que un individuo medio en la Gran Bretaña de 1900 poseía un CI en torno a 70, según los criterios de 1990. «Ello querría decir que el británico medio sufría trastorno límite de la personalidad, por lo que ni siquiera hubiera podido entender las reglas del críquet», bromea David Hambrick, psicólogo cognitivo de la Universidad estatal de Michigan. «Algo a todas luces absurdo», concluye.

Tal vez no seamos más inteligentes que nuestros antepasados, pero no cabe duda de que nuestras mentes han cambiado. Flynn cree que dicha transformación comenzó con la revolución industrial, la cual dio lugar a la educación generalizada, a familias con menos hijos y a una sociedad en la que las labores agrícolas se vieron reemplazadas por tareas técnicas o de planificación. Surgieron nuevas clases profesionales (ingenieros, electricistas, arquitectos industriales...) que exigían el dominio de principios abstractos. La educación, por su parte, propulsó la innovación y el cambio social, al tiempo que instauró un bucle de retroalimentación positiva entre nuestra mente y una cultura basada en la técnica, el cual no parece que vaya a concluir pronto.

En líneas generales, casi todos los expertos convienen con Flynn en que el origen del efecto que lleva su nombre se halla en la revolución industrial y los avances técnicos. Sin embargo, la identificación de causas más precisas —que podría redundar en beneficio de políticas educativas o sociales orientadas a reforzar el efecto— aún se resiste a los investigadores. No hay duda de que las mejoras en educación dan cuenta de una parte importante de los avances. A comienzos del siglo xx, por ejemplo, eran pocos los estadounidenses que pasaban más de siete años en la escuela. Hoy, la mitad de ellos ha recibido algún tipo de educación terciaria.

FUNDAMENTOS

Clases de inteligencia

¿Cómo se evalúa el cociente intelectual? Una medida habitual la proporciona la escala Wechsler de inteligencia infantil (WISC), compuesta por diez pruebas. Algunas se centran en el vocabulario del niño, en su capacidad para la aritmética o en sus conocimientos de carácter general. Otras examinan las facultades conceptuales. En el test de semejanzas, por ejemplo, se le pide que considere asociaciones abstractas entre pares de palabras (como «zorro» y «conejo»). Es solo en estas categorías conceptuales donde las puntuaciones aumentan sin cesar. El efecto Flynn apunta a una mayor facilidad en el manejo de los conceptos abstractos.

Semejanzas
Vocabulario
Aritmética
Puntuaciones de CI en los apartados del test de Wechsler
130
120
110
100
1948
1972
1989
2002

FUENTE: *ARE WE GETTING SMARTER? RISING IQ IN THE TWENTY-FIRST CENTURY*, POR JAMES R. FLYNN, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012

Con todo, la educación formal no alcanza para explicar el fenómeno en su totalidad. Algunos investigadores han atribuido el incremento del CI medio durante el siglo xx a un aumento en el «extremo izquierdo» de la distribución de puntuaciones entre la población; es decir, a los progresos por parte de los individuos que obtienen puntuaciones más bajas. Dicho resultado se dejaría explicar con facilidad a raíz de los avances en materia educativa. Hace poco, sin embargo, Jonathan Wai y Martha Putallaz, de la Universidad Duke, llevaron a cabo un estudio en el que analizaron los resultados correspondientes a 1,7 millones de escolares de entre 10 y 13 años. Los datos, que comprendían un período de 20 años, mostraban que el 5 por ciento de los estudiantes que mejor puntuaban seguía a la perfección la batuta del efecto Flynn. «Por primera vez disponemos de pruebas que indican que toda la curva de inteligencia se está elevando», observa Wai. Sus resultados llevan a pensar que, dado que toda la distribución parece desplazarse en sentido positivo, las causas culturales responsables del fenómeno deberían afectar por igual a toda la población. En un trabajo reciente, los investigadores conjeturan que el auge de videojuegos cada vez más complejos, e incluso de ciertos programas de televisión, podría proporcionar la clase de entrenamiento que ayuda a puntuar más alto en las pruebas de CI.

Para Rodgers, la universalidad del efecto Flynn hace que carezca de sentido buscar una sola causa: «Ha de haber cuatro o cinco, cada una de ellas resistente por sí sola a los vaivenes de las restantes». Las mejoras en la alimentación infantil, la universalidad de la educación, el menor tamaño de las familias y la influencia de una madre culta representan algunas de las razones consideradas más probables. «Mientras se han dado dos de ellas, incluso si un acontecimiento como la Segunda Guerra Mundial provocaba la desaparición de las otras dos, el efecto Flynn ha seguido observándose», concluye.

EVOLUCIÓN MENTAL

¿Qué nos depara el futuro? ¿Seguirán aumentando las puntuaciones en las pruebas de inteligencia? De lo que podemos estar seguros es de que el mundo que nos rodea va a seguir cambiando; en gran medida, a causa de nuestras acciones.

Flynn recurre a una analogía mecánica para describir la interacción a largo plazo entre mente y cultura: «En 1900, la velocidad de los automóviles era ridícula porque las carreteras eran nefastas. Con los vehículos actuales, en ellas nos haríamos pedazos». Pero las carreteras y los coches coevolucionaron. A medida que mejoraron las primeras, también lo hicieron los segundos. A su vez, los avances en automoción espolearon a los ingenieros para construir mejores carreteras.

Nuestra mente y nuestra cultura se hallan ligadas por un bucle de retroalimentación parecido. Estamos creando un mundo en el que la información adopta formas y velocidades inconcebibles hace solo unas décadas. Cada avance técnico exige mentes capaces de acomodarse a los cambios; estas, una vez adaptadas, vuelven a perfilar el mundo. No parece probable que el efecto Flynn se detenga durante este siglo, lo cual presagia un futuro en el que los habitantes de principios del siglo xxi seremos considerados premodernos y carentes de imaginación.

Por supuesto, los cambios en nuestra mente no se limitan a los que dejan su huella en un test de inteligencia. «La gente reacciona cada vez más rápido, estoy seguro», puntualiza Hambrick. «Una práctica habitual en los experimentos que miden tiempos de reacción consiste en descartar las respuestas que se producen en menos de 200 milisegundos. Se pensaba que era imposible reaccionar a algo en menos de 200 milisegundos. Pero si habla con alguien que realice este tipo de experimentos, le dirá que cada vez están teniendo que desechar más ensayos. La gente reacciona más rápido. Enviamos mensajes de texto, nos sumergimos en videojuegos y nos embarcamos en cada vez más actividades que requieren respuestas inmediatas. Creo que, una vez que dispongamos de datos suficientes, comenzaremos a medir un efecto Flynn asociado a la velocidad de percepción.»

Tal vez el efecto Flynn no debería causarnos tanta sorpresa. Más llamativa sería su ausencia, pues eso significaría que habríamos dejado de responder al mundo que hemos creado. Por sí mismo, el efecto Flynn no es bueno ni malo: refleja nuestra capacidad de adaptación. Las destrezas que ello revela pueden emplearse para destruir tanto como para crear. Con suerte, tal vez sigamos creando un mundo que nos haga cada vez más inteligentes, uno en el que nuestros descendientes se maravillen de nuestra candidez.

PARA SABER MÁS

James R. Flynn: ¿Somos ahora más listos? Marguerite Holloway en *Investigación y Ciencia*, n.º 270, págs. 38-39, marzo de 1999.

El efecto Flynn. James R. Flynn en *Mente y cerebro*, n.º 31, págs. 28-35, julio de 2008.

Are we getting smarter? Rising IQ in the twenty-first century. James R. Flynn. Cambridge University Press, 2012.

CONSCIENCIA

Delitos oníricos

En el estado neurológico a caballo entre el sueño y la vigilia, los delirios de la mente pueden adquirir trágica realidad

James Vlahos

[redacted]



Exteriormente, nada llamativo ofrecía en su aspecto aquel hombre que se presentó el 27 de junio de 2005 en el Centro Regional de Alteraciones del Sueño de Minnesota. Benjamín Adoyo (démosle ese nombre) era sonámbulo, como miles de otros pacientes. Este joven universitario de 26 años, originario de Kenia, había tenido episodios de deambulación nocturna desde su infancia. En los últimos tiempos, esa conducta empeoró. Adoyo se había casado en febrero. Despertaba a su mujer a empujones y se incorporaba en el lecho mascullando palabras carentes de sentido. La mujer, asustada, hacía cuanto podía para despertar a su marido, quien, ya consciente, no recordaba absolutamente nada. Vivían en un pisito de un solo dormitorio, en Plymouth, un barrio de Minneapolis. El reciente matrimonio se estaba resintiendo a causa del sonambulismo del marido. El informe del médico de atención primaria de los Adoyo reseñaba que «la esposa del paciente sufría ocasionales sobresaltos por el comportamiento de su marido, pero no lesiones, *per se*».

Los profesionales del centro del sueño, tras valorarle, indicaron a Adoyo que volviera el 10 de agosto para realizarle una electroencefalografía (EEG) nocturna de las ondas eléctricas generadas por su cerebro durante el sueño. En mitad de la noche, Adoyo empezó a palpar a ciegas los electrodos y a tironear de los cables que los conectaban, arrancándose mechones de pelo. Pero no se despertó. A la mañana siguiente, Michel Cramer Bornemann, director del centro, le explicó que los resultados del estudio confirmaban un trastorno del sueño conocido como parasomnia NoREM. Mientras le refería a Adoyo cómo se había arrancado los sensores, Bornemann le preguntó si había sentido algún dolor al hacerlo o al tirarse del pelo.

«Nada de nada», le respondió Adoyo, sin dudar lo más mínimo.

La siguiente visita de Adoyo al Centro de Sueño se produjo el 17 de octubre. Dijo que la medicación ansiolítica que Bornemann le había prescrito para tratar su sonambulismo no había resuelto gran cosa, por lo que Bornemann duplicó la dosis, de uno a dos miligramos. El médico esperaba sinceramente ayudar a su paciente. «Era un joven muy agradable, afectuoso y cautivador», recuerda Bornemann. «No tenía premonición alguna de que hubiera en su cuerpo nada maligno».

Adoyo no volvió a la consulta. Los médicos del centro pudieron saber la causa varios meses después, al recibir una carta de la fiscalía de Minnesota. De acuerdo con la misiva, su paciente, el 19 de octubre, solo dos días después de su última visita a la clínica, había sido detenido por el asesinato de su esposa; se le acusaba del crimen. «Estamos buscando a quién consultar, por si pudiera existir alguna relación entre su trastorno del sueño y su delito», se decía en la carta.

LOS AZARES DEL DORMIR

El hecho básico del sueño, y aparentemente, indiscutible, es que cada individuo se encuentra despierto o dormido, sin término medio. Es cierto que en el estudio científico del estado de inconsciencia, el sueño se clasifica en ciclos REM (movimientos oculares rápidos) y NoREM; este segundo tipo de sueño se divide, a su vez, en tres subtipos. En general, a lo largo del siglo y pico de investigación científica del descanso en humanos, se ha sostenido que las nociones de sueño y de vigilia corresponden a estados diferentes, de límites bien definidos.

Esta presunta existencia de fronteras tajantes entre uno y otro estados justifica el escepticismo de jueces y jurados cuando se alegan trastornos del sueño para explicar delitos como el de Adoyo. «Estaba dormido cuando lo cometí» sue-

GERALD SLOTA





James Vlahos, periodista independiente, ha escrito para *National Geographic Adventure, Popular Science* y *New York Times Magazine*.

na a justificación edulcorada, a «cuento chino», a abuso de la ciencia para eliminar la responsabilidad personal. Solo una persona en sus cabales puede incordiar, lesionar o matar a otra. No obstante, durante los últimos veinte años, la ciencia del sueño se ha visto revolucionada por una teoría nueva que contribuye a dar una explicación completa, desde los delitos cometidos en estado onírico hasta los fundamentos naturales del propio dormir. En palabras de Bornemann, «Estar dormido o despierto no es un fenómeno del todo o nada, de blanco o negro. En realidad es una gradación».

La idea de que un individuo pueda hallarse físicamente activo, aunque mentalmente inconsciente, está bien asentada en la cultura popular —recordemos las deambulaciones nocturnas de Lady Macbeth— y también en las salas de audiencia. En la jurisprudencia de EE.UU., el primer caso en que el sonambulismo sirvió de argumento para la defensa en un caso de homicidio, y con éxito, se dio en 1846, durante el juicio de Albert Jackson Tirrell, quien degolló, y casi decapitó, a una prostituta con una navaja de afeitar. En fecha más reciente, en 1987, un hombre de 23 años, Kenneth Parks, condujo un automóvil más de veinte kilómetros y mató a su suegra, sosteniendo que todo ello ocurrió sonámbulo e inconsciente. Acabaría absuelto.

Un homicidio en sueños siempre da llamativos titulares, pero felizmente es algo muy raro. La revista de investigación en neurociencias *Brain* daba en 2010 un recuento de 21 casos, con absolución del acusado en torno a un tercio de ellos. Otras conductas sin muerte, violentas, sexuales o delictivas por otras razones son, durante el sueño, mucho más comunes de lo que pudiera suponerse. Unos 40 millones de estadounidenses padecen trastornos del sueño; de acuerdo con una encuesta telefónica realizada a finales de los años noventa, se estimaba que el dos por ciento de los encuestados se había lesionado, o lesionado a otro, mientras dormía.

Bornemann, Mark Mahowald, director del centro del sueño, y su colega Carl Schenck se cuentan entre los más preeminentes expertos del mundo en parasomnias, término genérico para las conductas involuntarias durante esa fase. A menudo les llegan peticiones de asesoramiento desde el mundo del derecho. Para separar sus trabajos clínicos de los estrictamente forenses, estos médicos crearon en 2006 una entidad independiente, con Bornemann al timón y Mahowald y Schenck como asesores. Su nombre: Sleep Forensics Associates.

El trío opera a modo de agencia científica de detectives. Los más de 250 casos que la agencia ha llevado hasta el presente se reparten equitativamente entre labores para la fiscalía y para la defensa. Con independencia de quién haya de abonar sus honorarios, la metodología de la agencia no es limitarse a ofrecer una opinión médica, que respalde un veredicto deseado. Antes bien, esos médicos hacen cuanto pueden por descubrir la verdad. Bornemann se titula «investigador principal» y explica que, «en muchos aspectos, lo que yo soy es un neurocientífico que esboza una personalidad».

Los resultados de las investigaciones son impredictibles. En palabras de Bornemann, el fiscal podría decir, «refutando una defensa basada en parasomnia, podré conseguir una condena». Pero el trabajo de esta agencia ofrece también la posibilidad de una absolución. «Las conductas de auténtica parasomnia se producen sin consciencia, intención o motivación», prosigue Bornemann. «Por consiguiente, desde la perspectiva de un abogado defensor, existen fundamentos para una absolución.» Bornemann sabe perfectamente que tanto jueces como jurados son reacios a admitir la idea de gradaciones en el sueño. Así pues, en la sala de audiencia, no solo se juzga al acusado, sino también la definición misma de consciencia.

¿DESPIERTO E INCONSCIENTE?

La «teoría del sueño local» evidencia su esencia en su propia denominación: unas partes del cerebro pueden estar dormidas, mientras que otras se hallan despiertas. De ser correcta, la teoría contribuiría a explicar por qué el cansancio merma la seguridad en la conducción o por qué los sonámbulos abren los frigoríficos. Explicaría también la conducta de los «sexsomníacos», juego de palabras para designar a quienes acarician, en estado de inconsciencia, a sus compañeros de cama o a sus hijos pequeños. El concepto de sueño local, científicamente sistematizado, se introdujo en 1993. Apareció en un artículo firmado por James Krueger, hoy en la Universidad estatal de Washington en Spokane. En aquellas fechas, se trataba de una idea disparatada a juicio de los investigadores del sueño más acreditados. «*Todavía* es herética», subraya Krueger, pero los «localistas» constituyen ahora un subconjunto importante y bien considerado de especialistas en el sueño.

EN SÍNTESIS

Según algunos científicos, que el cerebro esté despierto o dormido no es una disyuntiva excluyente.

Sus investigaciones inducen a pensar que lo que reconocemos como dormir (ojos cerrados, inmovilidad física y pérdida de consciencia) se produce solamente después de que cierto número de partes del cerebro entren cíclicamente en estado onírico.

Si esta hipótesis de dormición parcial es correcta, partes de nuestro cerebro pueden estar dormidas mientras damos la impresión de hallarnos despiertos, y viceversa.

Este nuevo enfoque podría explicar por qué, en casos sumamente raros, los individuos pueden cometer graves delitos —homicidio incluido— mientras duermen.

Así miente el cerebro durmiente

Durante largo tiempo se ha venido admitiendo que el cerebro humano progresaba de forma bien coordinada a través de los complejos estados de la consciencia (*a la derecha*). Pero la investigación reciente (*abajo*) sugiere que los patrones de actividad neuronal en el sueño son más aleatorios de lo que se pensaba.

Corteza prefrontal dorsolateral

Corteza cingulada anterior

Opérculo parietal

Corteza cingulada posterior

Amígdala

Materia blanca frontal profunda

Corteza parahipocampal

Tegmento pontino

Ciclos regulares

Por razones que se ignoran, ciertas partes del cerebro que participan en la detección de errores y conflictos (cingulado anterior) y el desarrollo de la memoria a largo plazo (corteza parahipocampal) se vuelven más activas durante el sueño REM, mientras que la región que participa en la consciencia del dolor (cingulado posterior) se torna menos activa. Por ello, es raro que se sienta dolor físico en los sueños de la fase REM; en cambio, es frecuente soñar con peleas o vuelos en ese estado.

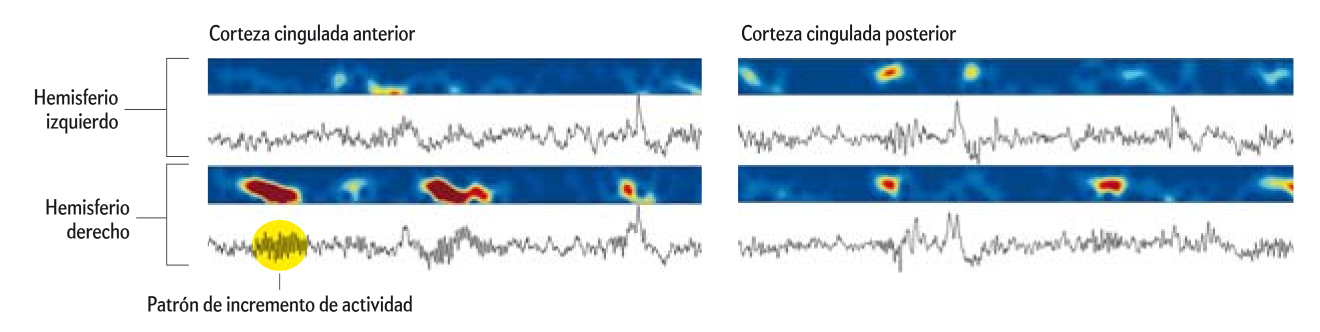


Mayor actividad — Menor actividad



Actividad irregular

Estos registros EEG muestran que las mitades izquierda y derecha de una misma parte del cerebro experimentan pulsos de actividad en diferentes momentos del sueño NoREM. Estos datos respaldan la hipótesis que afirma que las regiones del cerebro no se duermen todas a la vez, ni atraviesan al unísono los distintos estadios del sueño.



FUENTES: DE «REM SLEEP AND DREAMING: TOWARDS A THEORY OF PROTOCONSCIOUSNESS», POR J. ALLAN HOBSON, EN *NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE*, VOL. 10, NOVIEMBRE DE 2009 (*regiones cerebrales*); DE «REGIONAL SLOW WAVES AND SPINDLES IN HUMAN SLEEP», POR YUVAL NIR ET AL., EN *NEURON*, VOL. 70, N.º 1; 14 DE ABRIL DE 2011 (*EEG y espectrogramas*); AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO (*ilustración*)

El sueño, según la concepción tradicional, constituye un fenómeno que implica a la totalidad del cerebro. Más aún, se trata de un estado controlado, de arriba abajo, mediante circuitos reguladores. Para Krueger, esa tesis nunca tuvo apoyatura. Recuerda que ya existen pruebas, en el mundo real, de que en otros mamíferos se da el sueño cerebral parcial. Los delfines, por ejemplo, dormitan con la mitad del cerebro cada vez y nadan con un ojo abierto. Krueger, tras revisar, la bibliografía sobre lesiones cerebrales en el hombre, ha encontrado, además, que, con independencia de la región cerebral afectada y del alcance del daño, el sujeto no pierde la capacidad de dormir. Tal hallazgo refutaría la idea de la existencia de un centro de mando cerebral especializado para el sueño.

En un artículo publicado en 2011 y titulado *Local-Use Dependent Sleep* (Sueño dependiente de su uso local) Krueger, en coautoría con Giulio Tononi, de la Universidad de Wisconsin en Madison, exponía en compendio la tesis alternativa, a saber, que dormir constituye un proceso disperso, que opera de abajo arriba. «El nuevo paradigma considera el dormir una propiedad que emerge del resultado conjunto de unidades funcionales menores del cerebro», opinan Krueger y Tononi. Con otros investigadores de opinión afín, sospechan que hay partes aisladas del cerebro —redes neuronales o, tal vez, incluso neuronas individuales— que se duermen en diferentes momentos del día, dependiendo de cuánto esfuerzo hayan soportado recientemente. (Por ello, los investigadores describen el sueño como un fenómeno local, que afecta solo a determinadas partes del cerebro, en momentos diferentes y en función del uso que se les haya dado; se produce una vez que la región experimenta una fatiga suficiente.) Únicamente después de que la mayoría de las neuronas del cerebro se hallen durmientes se suscita el estado onírico característico: inmovilidad, ojos cerrados y relajación muscular. Pero mucho antes de llegar a ese punto, encontramos zonas del cerebro echando una cabezada.

De las pruebas más directas que respaldan esta teoría, buena parte procede del laboratorio de David Rector, compañero de Krueger en la estatal de Wisconsin. Rector trabaja con ratas. Estimula los bigotes del hocico, de una forma precisa y controlada. Cada bigote se halla asociado a una columna cortical concreta, un

grupo de cientos de neuronas estrechamente interconectadas, ubicadas en la superficie —la corteza— del cerebro. Insertando sondas hasta esas columnas corticales a través del cráneo del múrido, mide la respuesta eléctrica de estas estructuras a la estimulación de los pelos.

Rector empezó determinando qué aspecto ofrecía la respuesta eléctrica a la estimulación de los bigotes cuando el animal se hallaba conductualmente despierto y cuando estaba conductualmente dormido. Descubrió entonces sorprendentes excepciones a la pauta general. «La observación de columnas posiblemente adormiladas durante episodios de vigilia completa del animal y, a la inversa, de columnas posiblemente en estado de vigilia, mientras el animal permanecía dormido del todo, lleva a conjeturar que el sueño es una propiedad de las columnas corticales individuales», informaba en un artículo publicado en 2008 con Krueger.

Ni que decir tiene que, en las pruebas de laboratorio, a los probandos humanos no les gusta que les inserten sondas metálicas en el cerebro, por lo que los investigadores han tenido que idear medidas menos directas. En un trabajo de Hans Van Dongen, también del claustro docente de la estatal de Wisconsin, los voluntarios habían de estar atentos a una pantalla y pulsar un botón en cuanto apareciera un contador del tiempo de reacción. El tiempo de reacción de los sujetos, que deben repetir sin cesar esta acción durante 10 minutos, se va alargando al progresar la tarea. Van Dongen afirma que los tests de vigilancia, como éste, fatigan básicamente unas mismas vías nerviosas; además, la sobrecarga que supone el experimento las deja en estado somnoliento. En su opinión, tal hecho tiene más de prueba de sueño local, que de fatiga o aburrimiento global, porque el rendimiento de sus probandos mejora en cuanto se les permite ocuparse de una tarea diferente, que apele a una región cerebral distinta.

Si resulta posible que una persona se encuentre parcialmente dormida, hallándose en los otros aspectos al parecer despierta, es forzoso considerar la proposición recíproca: que se halle parcialmente despierta, mientras que, a juzgar por su conducta, está dormida. Esta posibilidad explicaría algo que desde hace mucho resulta paradójico: individuos insomnes que, tras una noche en el laboratorio, afirman no haber podido «pegar ojo» ni un momento, a pesar de que los registros EEG exhiben sin ambages las series de ondas cerebrales típicas del dormir. Buscando explicación a esa paradoja, Daniel Buysse, del Instituto del Sueño de la Universidad de Pittsburgh, ha efectuado varios estudios basados en las técnicas de neuroimagen sobre insomnes nocturnos. Arribó a la conclusión de que, hallándose los sujetos dormidos a tenor de lo indicado en el EEG y la observación conductual, las cortezas parietales, donde se formula el estado de vigilia, permanecían activas toda la noche. En este sentido, las declaraciones de los insomnes serían perfectamente verdaderas.

SIGUIENDO LAS PISTAS

«Dígame qué ocurre», pregunta la operadora de la comisaría.

«Vengan enseguida», clama, escueta, desde el otro extremo de la línea una voz masculina.

«Tiene que explicar lo que pasa», insiste la operadora.

«Hay un muerto», dice la voz.

«¿Dice usted que hay muertos?»

«Sí».

«¿Dónde?»

«En su casa. Hay un muerto. Acudan».

La llamada, recibida en el centro de urgencias de Hennepin County, a las 3:41 del 19 de octubre de 2005, había sido efectuada por Benjamín Adoyo. Utilizó el móvil de su mujer, que en aquel momento yacía en el suelo del cuarto de baño, encharcada en sangre.

Cuando en Sleep Forensics Associates fueron informados del homicidio por el abogado defensor de Adoyo, Bornemann se dispuso a entender tanto al presunto homicida como el delito mismo. Tras ser puesto al corriente por el letrado, estudió los informes de la policía y las transcripciones de las declaraciones de Adoyo en aquella madrugada. Visitó el apartamento. Se hizo preparar una animación por ordenador, para mejor reconstruir los sucesos que desembocaron en el crimen.

Una de las primeras cosas que llamó la atención de Bornemann fue la peculiar sintaxis de la llamada a la policía. Adoyo no dijo, «Mi mujer está muerta», sino «Hay un muerto». Tampoco dijo, «En nuestra casa», sino «En su casa». En otras palabras, daba la impresión de que Adoyo hablaba como quien no sabe quién es, ni quién es el muerto, ni lo ocurrido. Parecían expresiones de quien acaba de despertarse.

Caben otras explicaciones, desde luego. Es posible que Adoyo fuese culpable a sabiendas y que, cuando llamó, quisiera revelar a la policía lo menos posible. No obstante, al leer Bornemann los informes policiales, no apreció indicios de ocultación ni disimulo. Cuando los agentes del departamento de policía de Plymouth llegaron a la escena, Adoyo les estaba esperando en los peldaños de la entrada. En la comisaría, tras serle leídos sus derechos, Adoyo confesó enseguida que había atacado a su esposa, pero se mostraba muy impreciso en los detalles. En cierto momento del interrogatorio, le preguntó a uno de los agentes «¿Cómo se encuentra ella?»

Por estos datos iniciales —la ambigüedad de la llamada, la no ocultación y la amnesia parcial— Bornemann no descartaba por imposible que Adoyo atacase a su esposa en estado de sonámbulo. Pero un juez o un jurado desconfiarían del fundamento científico de semejante explicación antes de considerar una absolución. ¿Puede alguien matar durante el sueño, sin saberlo? Y de ser así, ¿en qué condiciones?

La teoría del sueño local proporciona los primeros atisbos de explicación. En personas sin parasomnias, el proceso por el que un grupo de neuronas entra en dormición o sale de ella, aunque no está ordenado desde un centro de control, sí se desarrolla de forma coordinada. No son los cambios neurológicos los únicos responsables de las transiciones de vigilia a sueño REM y a sueño NoREM. Cada uno de tales estados viene determinado por «centenares, literalmente» de variables hormonales, neuronales, sensoriales, musculares o fisiológicas, explica Mahowald, colega de Bornemann. Y añade: «Asombrosamente, estas variables recorren ciclos parejos; miles de millones de personas de todo el mundo van pasando por los estados de vigilia, REM y NoREM muchas veces cada 24 horas». Sin duda, hay bolsas de redes nerviosas alerta mientras duerme el resto del cerebro, y a la inversa. Tal es lo que nos enseña la teoría del sueño local; por lo demás, las transiciones son nítidas.

Mahowald y otros investigadores creen que las parasomnias se producen cuando se desajustan los pasos de un estado a otro, cuando la miríada de variables reguladoras pierde la sincronía. El resultado es un trastorno denominado disociación de estados, en la que se superponen los atributos físicos y mentales de la vigilia, el sueño profundo y la ensoñación. Los afectados sufren de formas graves de sueño local, con desconexión de partes importantes de su cerebro al tiempo que su cuerpo está activo.

Muchos casos de Sleep Forensics permiten ejemplificar cómo la disociación de estados desemboca en conductas delictivas. A finales de abril de este año, Bornemann se encontraba examinando la historia de un soldado estadounidense que, cuando su esposa intentó despertarle, la golpeó brutalmente con su pistola. Tras el suceso, aseguró que no tenía la menor intención de atacarla, ni tampoco recordaba haberlo hecho. Lo que sí recuerda es que soñaba, y en el sueño usaba un cuchillo para defenderse del ataque de un espía nazi. Esta historia le sugiere a Bornemann un posible caso de trastorno de la conducta REM, condición en la que los músculos de la persona afectada no se encuentran relajados, que es lo normal al dormir, y el sujeto es capaz de levantarse y realizar físicamente las fantasías que está viviendo en sueños.

Otro de los casos que Bornemann estaba investigando a finales del pasado abril concernía a un acomodado empresario de Utah. Una noche, mientras dormía, una hija suya de nueve años se deslizó en su cama, cosa que, al parecer, solía hacer la niña cuando no podía dormirse. El padre se despertó después y se descubrió, horrorizado, dando empujones pélvicos a su hija, mientras con la mano le tocaba los genitales.

Este empresario no tenía antecedentes de delitos sexuales. Tras el incidente fue evaluado por un psicólogo, se sometió a una prueba con el polígrafo e incluso le fue medida su tumescencia peneana mientras se le mostraban imágenes impúdicas de niños. Ninguna de estas medidas indicaba que fuera un pedófilo. Bornemann sospecha que tal conducta pudo ser consecuencia de un desorden del despertar, una subcategoría de disociaciones de estado en la que se incluyen sonambulismos, ingestas en sueños y sexsomnia. Comparten esos fenómenos diversos un mismo dato: se presentan cuando los atributos neurofisiológicos del sueño NoREM se superponen con las complejas facultades de movimiento que son propias de la vigilia.

El conocimiento de qué regiones cerebrales se hallan despiertas y de cuáles en letargo ayuda a explicar la perversidad y la violencia que a veces exhiben los parasomnes. En estudios basados en técnicas de formación de imágenes se aprecia que, durante el sueño NoREM, la corteza prefrontal —una estructura del cerebro situada justamente detrás de la frente, en la que se formulan los razonamientos y los juicios morales— exhibe mucha menos actividad que cuando el individuo está despierto. El mesencéfalo, mientras tanto, se mantiene activo y es capaz de generar conductas sencillas, denominadas pautas de acción fija. Bornemann explica que «tienden a ser de naturaleza muy primaria. Entre ellas se cuentan la capacidad de estar de pie, de caminar, de ataque depredatorio, las acciones de comer y beber, limpieza del pelo y las conductas sexuales o maternales». Normalmente, la corteza prefrontal censura tales acciones cuando están fuera de lugar, pero durante el sueño NoREM esta parte del cerebro ya no está de servicio. Las personas se parecen más a animales salvajes, gobernadas por deseos instintivos y reacciones impulsivas.

EL VEREDICTO

La fase crucial de toda investigación de Sleep Forensics tiene lugar en la entrevista de Bornemann con el acusado. Lo mejor es que sea cara a cara. A dos cuestiones debe Bornemann dar respuesta: si la persona sufre legítimamente un trastorno del sueño y si, conocidos todos los demás datos y pruebas, tal trastorno operó mientras se cometía el acto delictivo.

En el caso de Adoyo, Bornemann se encontraba en la muy insólita situación de haber tenido como paciente al acusado. Sabía, pues, que el joven no era un falsario. Miembros de la familia también sostuvieron que Adoyo había sido sonámbulo desde niño. La segunda cuestión, empero, implicaba mucha mayor gravedad. ¿Fue el trastorno de Adoyo la causa del homicidio? Tal cuestión no podía ser respondida con total certeza, porque Bornemann no podía retrogradar en el tiempo, penetrar en la mente de Adoyo y averiguar lo que éste pensaba durante el acto criminal. Dicho esto, no es fácil sostener una defensa basada en un falso sonambulismo. «El público general tiene la impresión de que durante el sonambulismo puede ocurrir cualquier cosa», explica Bornemann. «Lo cierto es que solo pueden ocurrir determinadas conductas y, por lo común, durante períodos breves.»

Por ejemplo, «en la gran mayoría de los casos de sonambulismo con actos violentos, la cercanía física es la clave», prosigue Bornemann. A menudo, la víctima yace al lado del parasomne o es atacada cuando intenta despertarle. Tal fue el caso del soldado que soñaba el ataque de un espía nazi y el de Parks, el conductor sonámbulo, que solo atacó a su familia cuando intentaron despertarle. Los delitos cometidos durante el sueño suelen ser inexplicables, carentes de móvil e impropios del personaje, caso del empresario de Utah que abusó, inconsciente, de su hija.

Durante la investigación de Adoyo, Bornemann pudo saber que su antiguo paciente no había estado en la proximidad física inmediata de su esposa antes de agredirla, sino echado en un sofá, mientras ella dormía en la alcoba. Además, la explosión de violencia no fue breve y espontánea, como lo son típicamente las inspiradas por un sueño, sino prolongada y «procedimental», con exhibición de varias conductas complejas. Adoyo entró en el cuarto donde dormía su mujer y le golpeó con un martillo; la persiguió después hasta el rellano, fuera del apartamento, y le obligó a volver hasta el cuarto de baño. Allí la acuchilló y estranguló. «Es sumamente raro ver tres mecanismos de violencia [a la vez]», afirma Bornemann.

Las dudas que le pudieran subsistir se esfumaron al admitir Adoyo que la pareja se había peleado en el último día de vida de la mujer, cosa que ella anotó en su diario y Bornemann pudo leer. Adoyo creía que su esposa tenía una relación extramarital, por haber encontrado preservativos en la ropa que la mujer iba a lavar. El delito podía no cuadrar con el carácter del acusado, pero no carecía de móvil, y Bornemann informó de todo esto a la fiscalía. Finalmente, Adoyo se declaró culpable de homicidio en segundo grado. Se encuentra cumpliendo una pena de 37 años de cárcel.

Bornemann, por su parte, asegura no estar personalmente investido de capacidad para determinar la inocencia o culpabilidad de las personas que investiga. Lo que su trabajo ofrece, afirma, es la oportunidad del estudio del comportamiento con trastornos agudos del sueño, que jamás podrán reproducirse en laboratorio. El objetivo es reunir pruebas y datos suficientes, que ayuden a modificar las ideas preconcebidas de jurados, jueces y público general, quienes conservan la opinión de que la consciencia es un estado del «todo o nada». En su opinión, «las neurociencias van muy por delante de los paradigmas de la comunidad jurídica, y ésta tiene que ponerse a la par».

PARA SABER MÁS

Violence in sleep. Frances Siclari et al. en *Brain*, vol. 133, n.º 12, págs. 3494-3509, diciembre, 2010. **brain.oxfordjournals.org/content/133/12/3494.long**

Sleep Forensics Associates: **sleepforensicsassociates.com/aboutSfa**

ENVEJECIMIENTO

Cumplir los cien años

Dos estrategias para investigar la longevidad pretenden alargar la vida hasta los cien años, o más

Katherine Harmon

[redacted]



EN SÍNTESIS

En su propósito de alargar la vida humana, los investigadores han adoptado dos estrategias.

Unos defienden la necesidad de centrarse en la cura de las enfermedades y en el reemplazo de las partes del cuerpo dañadas mediante tratamientos con células madre.

Otros abogan por frenar el proceso de envejecimiento a escala molecular y celular.

Hace un siglo, el estadounidense medio solo vivía 54 años. Muchos niños morían en la tierna infancia y dar a luz era uno de los mayores trances para cualquier mujer. En la actualidad, gracias a las vacunas, los antibióticos, la higiene y la mejora de los cuidados obstétricos, tenemos muchas más posibilidades de alcanzar la vejez y de no fallecer jóvenes. Un niño que nazca hoy se espera que llegue a cumplir los 78 años de edad.

Hasta ahora hemos ganado un lance fácil a la parca. Pero hoy que la gente vive más que nunca, debe hacer frente a dos amplios conjuntos de fuerzas que conspiran para imponer el límite último a la vida humana. En primer lugar, con cada año adicional que vivimos acumulamos daños en nuestras células y órganos, daños que acaban por desbordar los cada vez más lentos sistemas de reparación celular. La edad es, además, el principal factor de riesgo de afecciones mortales y frecuentes que en muchos casos no tienen cura todavía, como el cáncer, las cardiopatías y el alzhéimer.

Los científicos que persiguen extender los límites de la vida humana se preguntan: ¿a cuál de dos estrategias deberíamos destinar nuestros fondos de investigación, a frenar el envejecimiento o a luchar contra las enfermedades? En otras palabras, ¿fallecemos la mayoría de nosotros porque envejecemos o porque enfermamos?

Los que defienden centrarse en las enfermedades afirman que una estrategia reparadora constituye la mejor opción para alcanzar una vida centenaria. Si tras volcar nuestros esfuerzos en las principales causas de muerte (cáncer y enfermedades cardiovasculares) llegamos a curar esas dolencias y sustituir las partes deterioradas del cuerpo, habremos obtenido el mejor resultado posible, opina Sarah Harper, gerontóloga del Instituto Oxford del Envejecimiento. Seguir ganando terreno al cáncer y a las enfermedades cardiovasculares y perfeccionar las técnicas con células madre, incluida la elaboración personalizada de tejidos en el laboratorio, nos permitirá en un futuro no muy lejano disfrutar de una vida relativamente sana hasta los 100 o incluso 120 años.

Prolongar la vida activa de esa forma requiere descubrir el modo de reparar las partes del cuerpo que envejecen de forma natural. Ya se han conseguido fabricar tráqueas y maxilares con células madre [*véase* «Retos de la medicina regenerativa», por M. J. Barrero y J. C. Izpisúa, *en este mismo número*]. Si los avances en la investigación prosiguen al ritmo actual, como Harper y otros auguran, la creación de tejidos, órganos y huesos de repuesto no tardará en ser una realidad. Según ella, los adelantos graduales que se están realizando en las técnicas genéticas y en la investigación con células madre son los que nos ayudarán a alargar la vida.

Otros investigadores, en cambio, aseguran que debemos luchar contra el proceso de envejecimiento. Por mucho que sepamos curar el cáncer, apunta S. Jay Olshansky, de la facultad de salud pública de la Universidad de Illinois en Chicago, seguiremos sufriendo cardiopatías o alzhéimer, o al menos degeneración macular. La medicina regenerativa podrá resolver los problemas de un órgano, pero no


LEVI BROWN, TRUNK ARCHIVE

de todos a la vez. «Poder estrenar un nuevo esófago será algo estupendo, pero ello no solucionará todo lo demás.»

La situación cambiaría si lográsemos retrasar el envejecimiento a escala molecular, afirma Olshansky. Su estrategia no se centraría en un solo órgano o aparato, sino en la mente y el cuerpo en su conjunto. Él y sus colaboradores han emprendido un proyecto a gran escala que tiene como objetivo frenar el envejecimiento. Ambiciona alargar siete años la vida de todo el mundo, meta que podría alcanzarse sin dificultad en los próximos 10 o 20 años. Y dado que el riesgo de enfermedad se duplica cada siete años, ganar ese tiempo a la senectud permitiría reducir el riesgo de enfermedad a la mitad, según su razonamiento.

Olshansky sitúa la «fecha de caducidad» natural del cuerpo humano en torno a los 85 años. A esa edad nuestras células han sufrido una cantidad abrumadora de estrés oxidativo, un daño causado por la producción de radicales libres del oxígeno que alteran el ADN, las proteínas y otros componentes celulares. Olshansky y sus colaboradores están estudiando a esos pocos elegidos que llegan a los 100 o 110 años con una buena salud física y mental. Esas personas, señala, podrían estar experimentando el envejecimiento celular a un ritmo más lento, tal vez porque sus células resisten mejor el estrés oxidativo.

Un «tratamiento» contra el envejecimiento, aparte del consejo de seguir una alimentación sana y practicar ejercicio, podría acabar materializándose en forma de píldora. Pero crear algo tan complejo como una sustancia que ayude a retrasar el envejecimiento exige un esfuerzo científico serio. Y eso, a menudo, significa comenzar por la escala molecular y los estudios con ratones. El premio Mprize, patrocinado por la Fundación Matusalén, se destina a los equipos de investigación que superan el récord de longevidad en el ratón. Uno de los compuestos que se está examinando es la rapamicina, que actúa sobre la misma vía celular que la restricción calórica. Tanto la rapamicina como la restricción calórica han demostrado prolongar la vida de los ratones. Pero como tantas otras panaceas anunciadas, la rapamicina no se halla exenta de inconvenientes. La sustancia deprime

el sistema inmunitario, lo que de momento está frenando su empleo a gran escala. Las historias que llaman a la prudencia abundan: el resveratrol, un antioxidante obtenido del vino tinto que había sido la gran promesa contra la senectud, ha flaqueado en estudios recientes. Y no todos los especialistas esperan que la rapamicina funcione tan bien en los humanos como parece hacerlo en los ratones de laboratorio.

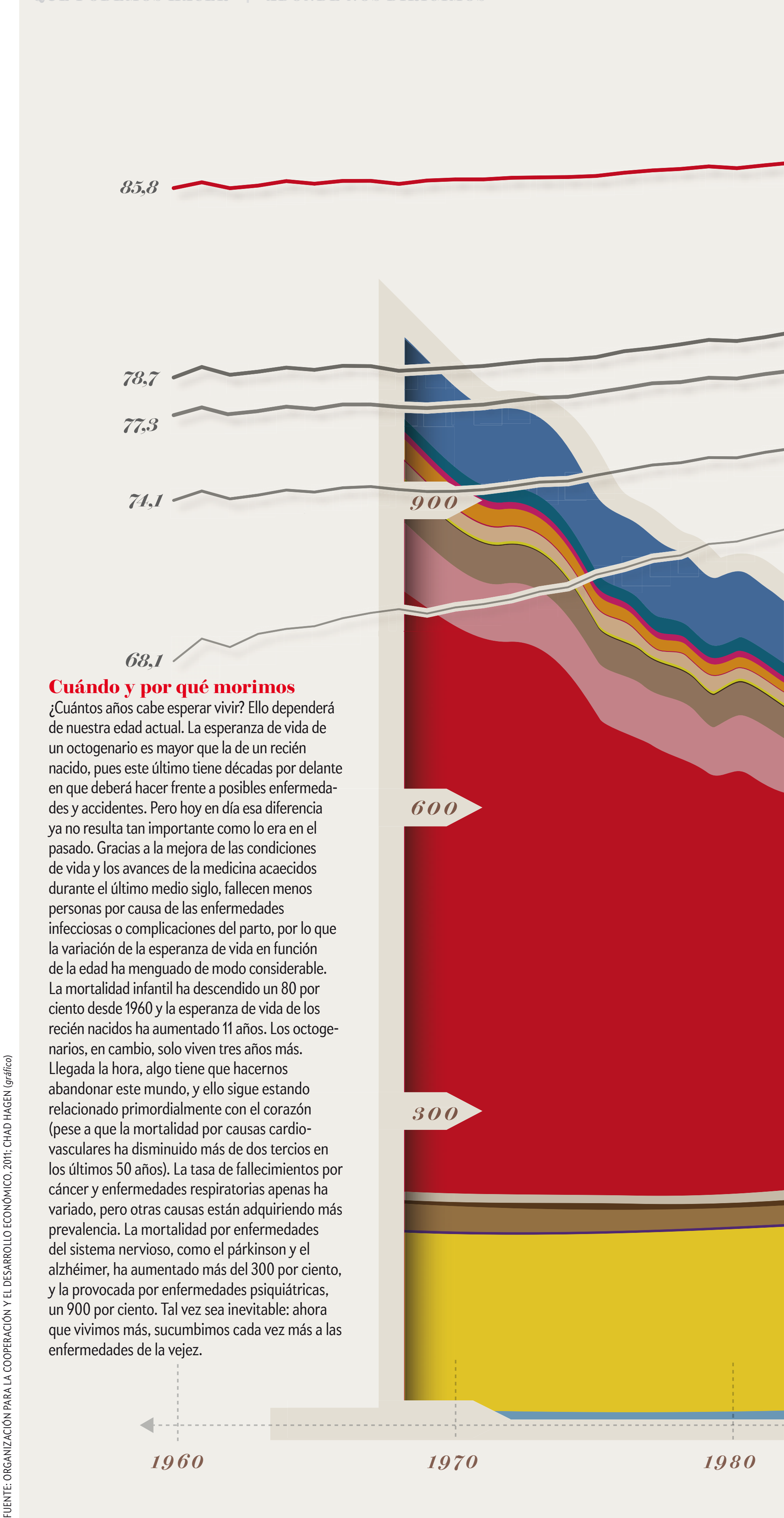
Además, la investigación para alargar la vida es desde hace tiempo un terreno abonado para la pseudociencia, plagado de remedios milagrosos y esperanzas vanas. Olshansky y Harper no ocultan sus reservas ante quienes afirman que pronto viviremos 150 años o más. La mejor manera para aumentar la esperanza de vida de la mayoría de las personas probablemente consista en una estrategia combinada de todo lo anterior. Necesitaremos mejores tratamientos contra las enfermedades y más avances a escala molecular y en medicina regenerativa, además de seguir los consabidos hábitos saludables.

Aunque el estudio de la longevidad y de las enfermedades no nos depare logros extraordinarios, el lento pero incesante progreso científico, por no mencionar los adelantos en la atención sanitaria y la higiene, contribuirá a alargar nuestras vidas. Cada año la esperanza de vida media en el mundo aumenta tres meses. No es un mal dato. Incluso en las regiones desarrolladas como Europa se siguen ganando cerca de dos años cada década. Con suerte, y con un trabajo continuado, las personas que vivan dentro de cien años juzgarán nuestra actual esperanza de vida como lamentablemente corta.

Katherine Harmon *es redactora de* Scientific American

PARA SABER MÁS

¿Podemos retardar el envejecimiento? Michael R. Rose en *Investigación y Ciencia*, n.º 280, págs. 60-65, enero de 2000.
Los genes de la longevidad. David A. Sinclair y Lenny Guarente en *Investigación y Ciencia*, n.º 356, págs. 6-14, mayo de 2006.
¿Por qué no somos inmortales? Thomas Kirkwood en *Investigación y Ciencia*, n.º 410, págs. 20-27, noviembre de 2010.
Un nuevo camino hacia la longevidad. David Stipp en *Investigación y Ciencia*, n.º 426, 16-23, marzo de 2012.



Cuándo y por qué morimos

¿Cuántos años cabe esperar vivir? Ello dependerá de nuestra edad actual. La esperanza de vida de un octogenario es mayor que la de un recién nacido, pues este último tiene décadas por delante en que deberá hacer frente a posibles enfermedades y accidentes. Pero hoy en día esa diferencia ya no resulta tan importante como lo era en el pasado. Gracias a la mejora de las condiciones de vida y los avances de la medicina acaecidos durante el último medio siglo, fallecen menos personas por causa de las enfermedades infecciosas o complicaciones del parto, por lo que la variación de la esperanza de vida en función de la edad ha menguado de modo considerable. La mortalidad infantil ha descendido un 80 por ciento desde 1960 y la esperanza de vida de los recién nacidos ha aumentado 11 años. Los octogenarios, en cambio, solo viven tres años más. Llegada la hora, algo tiene que hacernos abandonar este mundo, y ello sigue estando relacionado primordialmente con el corazón (pese a que la mortalidad por causas cardiovasculares ha disminuido más de dos tercios en los últimos 50 años). La tasa de fallecimientos por cáncer y enfermedades respiratorias apenas ha variado, pero otras causas están adquiriendo más prevalencia. La mortalidad por enfermedades del sistema nervioso, como el párkinson y el alzhéimer, ha aumentado más del 300 por ciento, y la provocada por enfermedades psiquiátricas, un 900 por ciento. Tal vez sea inevitable: ahora que vivimos más, sucumbimos cada vez más a las enfermedades de la vejez.

FUENTE: ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO, 2011; CHAD HAGEN *(gráfico)*

ESPERANZA DE VIDA

Países de la OCDE

Esperanza de vida a los 80 años — *88,7 años*

65 años — *83,5 años*

60 años — *83,1 años*

40 años — *80,9 años*

Al nacer — *79,2 años*

CAUSAS DE MORTALIDAD

Por 100.000 muertes (EE.UU.)

- Heridas y otras causas externas
- Causas desconocidas o no diagnosticadas
- Defectos de nacimiento y otras malformaciones congénitas
- Enfermedades perinatales en fetos y recién nacidos
- Embarazo, parto y otras complicaciones obstétricas
- Enfermedades renales, genitales y del aparato urinario y reproductor
- Enfermedades óseas, musculares o del tejido conjuntivo
- Infecciones cutáneas, quemaduras y otras enfermedades de tejidos adyacentes
- Enfermedades estomacales, hepáticas, pancreáticas y otras afecciones del aparato digestivo
- Neumonía, gripe y otras enfermedades respiratorias
- Cardiopatías, hipertensión y otras enfermedades del sistema circulatorio
- Enfermedades del sistema nervioso
- Trastornos mentales y del comportamiento
- Diabetes, obesidad y otras enfermedades metabólicas y endocrinas
- Hemopatías
- Tumores malignos
- Infecciones de transmisión sexual y otras enfermedades infecciosas y parasitarias

1990 2000 2010

por Susan H. Greenberg

Un hogar en las montañas

Después de años de disputas legales, el Gobierno estadounidense anuncia la designación de un hábitat crítico para el jaguar



Los jaguares, los terceros felinos de mayor tamaño después de los leones y tigres, y los mayores del continente americano, solían medrar en Estados Unidos. En los siglos xviii y xix, podía vérselos en Arizona, Nuevo México, California y Texas. En ocasiones, vagabundeaban hacia el este o hacia el norte, llegando hasta Carolina del Norte o Colorado.

A medida que los humanos han ido usurpando su territorio, el hábitat de estos felinos en peligro de extinción se ha ido desplazando hacia el sur. En la actualidad, se extiende desde la zona norte de Argentina hasta el desierto de Sonora, en México. Sin embargo, los animales llegan a la zona sudoeste de Estados Unidos con la suficiente frecuencia como para que algunos conservacionistas propusieran la designación de un hábitat crítico para los jaguares en el país. Después de años de disputas legales, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre (FWS) estadounidense ha atendido por fin la petición. En un plan publicado en agosto, la agencia ha propuesto designar como hábitat crítico una superficie total de casi 3400 kilómetros cuadrados en zonas montañosas de Arizona y Nuevo México.

La cuestión de si los jaguares merecen o no un hábitat crítico refleja un debate más amplio en círculos conservacionistas. ¿Cómo se determinan las prioridades de gasto para las distintas especies que están desapareciendo lentamente del planeta? [*véase* «¿Qué especies sobrevivirán?», por M. Nijhuis; Investigación y Ciencia, octubre de 2012]. Muchos expertos creen que la mejor forma de ayudar al jaguar consiste en reforzar los recursos en el sur de la frontera, donde los felinos viven y se reproducen. En cambio, Michael Robinson, del Centro de Diversidad Biológica, uno de los grupos que llevó a juicio al FWS para que designase un hábitat crítico, afirma que el objetivo debería ser ayudar a los jaguares a volver a poblar partes de los Estados Unidos en las que se han extinguido. Sobre todo, porque docenas de ellos fueron abatidos de acuerdo con un programa federal de exterminio de depredadores que siguió vigente hasta la década de los sesenta. Robinson insiste en considerar el territorio histórico de una especie, no solo una instantánea puntual en el tiempo.



VINCENT J. MUSI, NATIONAL GEOGRAPHIC STOCK

por Alfredo Marcos

Alfredo Marcos es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid.



La ciencia al límite

Hay límites que configuran la ciencia, mientras que otros la constriñen

¿Tiene límites la ciencia? En el supuesto de que los tenga, ¿de qué tipo son? Y, en cualquier caso, ¿es bueno que se halle limitada? Estos interrogantes nos llevan indefectiblemente a preguntarnos por el propio concepto de límite. Sin una aclaración previa de esta noción será imposible dar respuesta a las cuestiones señaladas.

La palabra «límite» viene del latín *limes*. En dicha lengua, se refiere al sendero que separa una finca de otra, terreno de nadie, transitable por todos. El límite configura y constituye la finca, le da forma, contribuye a su identificación. Sin límite, no existe propiamente tal entidad. El límite de una finca la distingue de otras, la separa, pero al mismo tiempo la comunica, pues no deja de ser un camino. Como senda que es, posee un cierto espesor físico; no es una mera línea geométrica. Su grosor permite que lo pensemos con zonas borrosas, territorios ambiguos, aptos para la colaboración o para el conflicto. El límite, como sendero, no es simplemente una entidad «a la vista», dispuesta para nuestra contemplación. Es también una entidad «a la mano», que invita a la acción de caminar, de recorrer, de penetrar, de explorar, de atravesar o rebasar... Es más, se trata de una entidad que surge de nuestra acción: «Se hace camino al andar».

Uno puede sentirse a gusto dentro de sus propios límites, como dentro de su propia piel. Los límites que me configuran están donde deben estar. Hacen justicia a la naturaleza de las cosas. O, por el contrario, podemos sentir los límites como constricciones incorrectas, quizás impuestas injustamente, como una camisa de fuerza. En este segundo caso, nuestra actitud nos impele a romperlos o traspasarlos. El límite es visto como algo positivo, valioso, que contribuye a constituir una entidad, a traerla al ser; o bien como algo negativo, que inmerecidamente la constriñe. Puede ser, además, nítido o borroso, fijo o dinámico, permeable o no.

Si el viaje que hemos recorrido a lo largo del *limes* latino ha sido enriquecedor, otro tanto podemos esperar de un periplo por el *horion* griego, que los diccionarios al uso traducen por «límite» o «frontera». Aquí —o más bien ahora—, la dimensión temporal salta a la vista. Nuestras *horas* contadas son límites del tiempo. Constriñen y encarcelan su flujo, sí, pero a cambio le dan orden y sentido. Las Horas (*Horai*), en la mitología griega, eran las diosas que ponían orden y regularidad en la naturaleza, que gestionaban el benéfico sucederse de las estaciones. Desde esta perspectiva, son precisamente los límites los que nos separan del caos y de la confusión.

No lejos de *horion* hallamos las palabras griegas *horama* y *horasis* (vista, visión), así como *horizo* (limitar), en la cual vislumbramos ya nuestro «horizonte». Aquí sí, el límite constituye una entidad «a la vista» y nunca totalmente «a la mano». El horizonte es un límite visual huidizo, inalcanzable, lo cual no quiere decir que no afecte a nuestra acción, al menos como objetivo *frente* a nosotros, como *frontera*. Ambas nociones, horizonte y frontera, se han aplicado con profusión a la ciencia. Pongamos tan solo un par de ejemplos notables y mutuamente contradictorios: Vannevar Bush, por entonces director de la estadounidense Oficina de Investigación y Desarrollo Científicos, enviaba en julio de 1945 un informe al Presidente de los EE.UU. con el significativo título de *Science, the endless frontier* («La ciencia, el confín sin límites»). Por su parte, Bentley Glass, quien fuera presidente de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia, dirigió a esta asociación en 1970 un discurso titulado *Science: Endless horizons or golden age?* («La ciencia: horizontes sin límites o edad de oro?»), que concluía con la aseveración de que «ya no existen horizontes infinitos» para la ciencia.

Vemos ahora que pensar los límites de la ciencia no es tarea simple. Exige que reflexionemos sobre un complejo entramado de límites de distinta naturaleza, de diverso valor, relacionados también en diferentes modos con nuestra propia acción. Y las respuestas que obtengamos abrirán inexorablemente nuevas preguntas acerca de nuestras acciones: ¿qué hemos de hacer con los límites de la ciencia? ¿Han de ser respetados? ¿Incluso impuestos? Y si fuera así, ¿desde qué instancias? ¿Han de ser rebasados, conquistados, vencidos? ¿Es bueno que tracemos límites «geométricos» perfectos, o nos convienen límites «geográficos» transitables, con espesor, o incluso difusos?

El filósofo de la Universidad de Pittsburgh Nicholas Rescher dedicó un libro entero a la cuestión de los límites de la ciencia. El texto resulta muy esclarecedor y de gran ayuda para la presente tarea. Según el autor, «debemos reconocer que varios importantes problemas evaluativos y cognitivos quedan completamente fuera del campo de la ciencia». Rescher piensa en términos de territorios, con sus límites o fronteras. La ciencia ocupa uno de estos dominios, pero más allá del mismo existen otras formas legítimas de conocimiento y de acción. A este tipo de límites, que configuran el perfil de la ciencia sobre el trasfondo de nuestro mundo de la vida, podríamos denominarlos *límites constitutivos*. Se trata de límites borrosos, más «geográficos» que «geométricos», pues siempre habrá contenidos cognitivos y acciones de dudosa asignación; transitables, pues debe haber paso de la ciencia a la vida y viceversa; y positivos, en el sentido de que, más que constreñir, configuran el campo de la ciencia.

Ya dentro de dicho campo, nos topamos con un segundo tipo de límites, los *límites teóricos*. Estos poseen un matiz

más restrictivo que constitutivo, y probablemente unos perfiles más «geométricos» que «geográficos». Fuera de los mismos quedarían los problemas científicos que la ciencia, por razones teóricas, nunca conseguirá abordar y menos aún solucionar (nunca conoceremos de forma exacta y simultánea la posición y el momento de una partícula). En el interior de los límites teóricos hallaríamos los problemas que la ciencia, al menos en teoría, podría llegar a abordar con éxito.

Ahora bien, no todos los problemas científicos abordables en la teoría lo son en la práctica. Es decir, existe un tercer tipo de límites: los *límites prácticos*. Por ejemplo, las capacidades del Gran Colisionador de Hadrones del CERN, el mayor y más potente acelerador de partículas, marcan un límite práctico. Si un experimento rebasa las capacidades de esta instalación, sencillamente no se puede llevar a cabo por el momento. En la opinión de Rescher, buena parte de los límites prácticos pueden reducirse a términos económicos. Pero no es así en todos los casos. Pensemos en los que derivan de la ausencia de ciertos desarrollos matemáticos; ha habido momentos en los que la matemática que requería una parte de la ciencia natural no se hallaba disponible. Los límites prácticos pueden ser también de carácter lingüístico, moral, social, político, ecológico... A título de simple indicación, podemos recordar que la ciencia, en su fase de investigación o de aplicación, *puede* rebasar ciertos límites morales, que, sin embargo, no *deben* ser rebasados. Estos límites morales están interconectados con otros de tipo político, social o ecológico, que en algunos casos deben ser superados y, en otros, respetados.

En suma, sabemos que parte de la ciencia posible en la teoría nunca será posible en la práctica. Pero no podemos saber de antemano qué parte será esa. Según Rescher, no hay modo de precisar qué problemas concretos quedarán al margen del desarrollo científico. Problemas que hoy están más allá de los límites prácticos, quizá no lo estén mañana. Nos hallamos ante un límite de tipo horizonte, borroso y cambiante. Siempre está ahí, pero se desplaza conforme avanzamos. Funciona como reto y frontera. Nos invita a la transgresión, pero esta nunca acaba de cumplirse. Cualquier límite práctico podría ser superado, pero nunca podremos superar todos los límites prácticos.

En el territorio de lo prácticamente posible encontramos un cuarto tipo de límites, los *límites por falibilidad*. Estos están causados por nuestra inoperancia personal, los defectos organizativos e institucionales, nuestra falta de atención o de trabajo o de honradez, los errores que inevitablemente cometemos dada nuestra naturaleza humana... ¡demasiado humana! Estos límites separan la ciencia prácticamente posible de la ciencia efectiva. Poseen también aspecto de horizonte. No son superables en su totalidad, aunque cada uno de ellos individualmente sí lo sea. Es decir, la ciencia será siempre falible e inacabada, pero ninguno de sus errores viene dictado por la fatalidad; cada uno de ellos puede ser evitado o corregido. El intento de superación de esta clase de límites constituye una exigencia, por supuesto, ya que se trata de límites en sentido puramente negativo: son constricciones sobre el desarrollo de la ciencia que generan deficiencias.



EVGENY KUKLEV/ISTOCKPHOTO

Hemos transitado ya por los límites constitutivos, los teóricos, los prácticos y los límites por falibilidad. Es hora de recordar la conocida máxima de Píndaro: «Llega a ser lo que eres». Si la ciencia *es* lo que marcan sus límites constitutivos, pero solo *ha llegado a ser* lo que marcan los límites por falibilidad, a la diferencia entre lo uno y lo otro podríamos llamarla *diferencia de Píndaro*. Colmar esta diferencia constituye la tarea última, irrenunciable e inalcanzable, de la empresa científica.

PARA SABER MÁS

The limits of science. Peter Medawar. Oxford University Press, 1984.

Los límites de la ciencia. Nicholas Rescher. Tecnos, 1994.

Human nature and the limits of science. John Dupré. Oxford University Press, 2002.

Gadamer and the limits of the modern techno-scientific civilization. Stefano Marino. Peter Lang, 2011.

por Luis Sanz Menéndez

Luis Sanz Menéndez es profesor de investigación del CSIC y director del Instituto de Políticas y Bienes Públicos.



Más difícil todavía

Claves para afrontar, en tiempos de recortes, mejoras estructurales en el sistema de investigación español



Los sistemas de investigación (I+D) se caracterizan por sus recursos. En 2010, España gastó en I+D un 1,39 por ciento del PIB; los países de la Unión Europea, en promedio, un 2,01 por ciento. Ello nos indica que el tamaño del sistema de investigación español es significativamente menor de lo deseable, dado nuestro nivel de riqueza. Con todo, este indicador resulta insuficiente para comprender la naturaleza, los resultados, el impacto y los beneficios que genera la investigación, así como los elementos que determinan que unos sistemas de I+D sean mejores que otros.

Un sistema de I+D puede compararse con un ecosistema, en el cual conviven, cooperan y compiten actores de similar y diversa naturaleza; los recursos y los flujos económicos son factores importantes, pero también lo son los incentivos, la capacidad de adaptación de los actores al entorno y su potencial para transformarlo. Para comprender un sistema de investigación debemos fijarnos en la calidad y excelencia de sus investigadores, así como de las organizaciones e instituciones implicadas.

Mientras que en los últimos años los niveles de excelencia de los investigadores en España han progresado, e incluso puede hablarse de éxito en la atracción internacional de talento, el informe mundial SIR (de SCImago Institutions Rankings) de 2012 revela que la calidad media de los resultados de investigación de nuestras instituciones es inferior a la de los países de nuestro entorno y nivel de desarrollo. Mejorar la calidad de los investigadores que se reclutan e integran solo puede hacerse por medio de la apertura, la búsqueda del mejor talento disponible allá donde esté, una retribución adecuada y diferenciada de acuerdo con su rendimiento y a través de mecanismos competitivos como los que rigen el otorgamiento de proyectos de I+D por el Consejo Europeo de Investigación o la contratación de investigadores por ICREA o Ikerbasque en España.

Tampoco nuestras instituciones de investigación presentan, en general, una calidad organizativa suficiente. Los incentivos van contra el talento y la creatividad, lo cual hace parecer héroes y esforzados voluntaristas a los que trabajan e intentan situarse fuera de las estructuras dominantes. Bien es verdad que han surgido, por iniciativa de Gobiernos autonómicos e incluso el central, organizaciones científicamente focalizadas y altamente competitivas que evidencian que las cosas pueden hacerse mejor (pensemos en el Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas, el Instituto de Ciencias Fotónicas o el Centro de Regulación Genómica, entre otros).

El modelo organizativo dominante no es solo consecuencia de un sistema de gobernanza que prima el interés de los empleados y no la prestación del servicio a la sociedad o el desarrollo de la misión, sino también de algunos aspectos sistémicos y organizativos que, combinados, representan un grave problema para el buen funcionamiento del sistema de investigación.

Primero, la falta de colaboración y coordinación. La limitada autoridad de la dirección o el liderazgo científico en las organizaciones conlleva una fragmentación de las agendas de investigación. A ello también contribuye un sistema de financiación competitiva dirigido casi exclusivamente a investigadores individuales; una vez garantizados los salarios por las Administraciones Públicas, se potencian «reinos de taifas» y un modelo basado en la competencia individual y no en la cooperación.

Segundo, el tamaño insuficiente de los grupos de investigación. Predomina una estructuración en unidades de dimensiones reducidas y sin los mecanismos necesarios para afrontar problemas y desafíos científicos de relevancia. Las organizaciones suelen carecer de estrategias de especialización y diferenciación competitiva del entorno, y de la capacidad de implementarlas. En este sentido, la situación de nuestras universidades es dramática, y es previsible que en tiempos de dificultad financiera se agrave.

Tercero, la burocratización y el carácter funcionarial de la carrera investigadora y académica, muchas veces basada en la lealtad y la permanencia. A los investigadores no se les ofrece la posibilidad de obtener mejoras asociadas al rendimiento individual extraordinario, ni margen para negociar aumentos retributivos y de recursos según su valía y contribución a los objetivos comunes. No es este el marco más adecuado para atraer y retener a los mejores, a pesar de las vocaciones de servicio que puedan identificarse.

Por último, los modelos de organización de la investigación y de la financiación de la misma siguen dominados por las disciplinas tradicionales y las áreas administrativas de conocimiento. Ello impide que los esfuerzos para hacer avanzar el conocimiento se articulen alrededor de la búsqueda de soluciones interdisciplinares para problemas globales [*véase* «¿Se acabaron los genios?», por Agustí Lledós; Investigación y Ciencia, abril de 2011].

En ese contexto de problemas estructurales, la política de reducción del gasto público no debería aplicarse de modo indiscriminado en las universidades y el sector investigador, con las recetas utilizadas en el resto de la función pública, sino de modo singular. Deberían generarse incentivos para la retención de los mejores y más productivos, en cuya captación temporal se ha invertido tanto, y evitar una reversión de las incipientes prácticas que priman la excelencia.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Bases biopsicológicas de la obesidad

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad

Cuadernos MENTE Y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

NEUROINGENIERÍA

Mover con la mente

La idea de que los paralíticos controlen sus extremidades con el pensamiento ha dejado de ser una fantasía cinematográfica

Miguel A. L. Nicolelis

[redacted]



Pudiera ser que, en 2014, miles de millones de espectadores de todo el mundo recuerden el partido inaugural de la Copa del Mundo de Fútbol, en Brasil. Y no solo por los goles que marque la selección brasileña o por las tarjetas rojas mostradas a sus adversarios. En ese día, mi laboratorio de la Universidad Duke, especializado en técnicas de control de miembros robóticos mediante señales eléctricas cerebrales, se propone, en unión de colaboradores europeos y brasileños, establecer un hito en la superación de parálisis.

Si logramos resolver problemas todavía formidables, el saque de honor de la Copa del Mundo podría ser efectuado por un adolescente con parálisis que, arropado por los dos equipos en liza, saltaría al césped portando un traje robótico —un exoesqueleto— confeccionado a la medida de su cuerpo y ceñido a sus piernas. Sus primeros pasos por la cancha serán controlados por señales motoras originadas en su cerebro y, desde allí, enviadas a una mochila computadora, del tamaño de un portátil, que nuestro paciente llevará a la espalda. Esta computadora habrá de traducir las señales eléctricas cerebrales en órdenes digitales para los motores del exoesqueleto, a fin de que este, ante todo, estabilice el peso del portador y, después, coordine los movimientos de su deambulación por el terreno de juego. Luego, al acercarse al balón, nuestro lanzador habrá de visualizar mentalmente un pie en contacto con la bola. Trescientos milisegundos después, sus señales cerebrales instruirán al pie robótico del exoesqueleto para que enganche por debajo la esfera de cuero y, a la brasileña, la lance a lo alto.

Esta demostración científica de una técnica radicalmente nueva hará ver, a miles de millones de espectadores de todo el planeta, que el control cerebral de máquinas ha salido de los laboratorios y de las fantasías ingenieriles, para abrirse camino en una nueva era, en la que lleguen a ser realidad medios capaces de dotar de movilidad a pacientes discapacitados, débase a accidentes o enfermedades. Avanzamos hacia técnicas que, tal vez en la próxima década, vinculen el cerebro con aparatos mecánicos, electrónicos o virtuales. Semejantes progresos proveerán de movilidad no solo a víctimas de accidentes o guerras, sino también a las de síndrome lateral amiotrófico (enfermedad de Lou Gehrig), de párkinson o de otros trastornos de la conducta motora, que impiden extender los brazos, asir con las manos, dificultan la ambulación o bloquean la producción del habla. Los dispositivos neuroprotéticos, auténticas interfaces entre el cerebro y la máquina, permitirán mucho más que ayudar a inválidos. Harán posible la exploración del mundo de una forma revolucionaria, dotando a individuos sanos de la facultad de multiplicar sus destrezas sensoriales y motoras.

En ese escenario futurista, las ondas eléctricas voluntarias, el alfabeto biológico subyacente al pensamiento humano, servirán para maniobrar a distancia robots de cualquier tamaño, controlar aeronaves y, tal vez, compartir entre individuos pensamientos y sensaciones, creando así una red colectiva de base cerebral.

MÁQUINAS DE PENSAMIENTO

El liviano traje corporal destinado al lanzador, aún no designado, se halla en fase de desarrollo. Un prototipo, empero, se está construyendo ya en el laboratorio de Gordon Cheng, de la Universidad Técnica de Múnich, miembro fundador del Walk Again («Camina de nuevo»), un proyecto internacional sin ánimo de lucro, con participación del Centro de Neuroingeniería de la Universidad Duke, la Universidad Técnica de Múnich, el Instituto Federal de Tecnología de Lausana y el Instituto Inter-

KEMP REMILLARD





Miguel A. L. Nicolelis ha sido precursor en el campo de la neuroprotética. Profesor de neurociencia en la facultad de medicina de la Universidad Duke, codirige el centro de neuroingeniería de dicha academia.

EN SÍNTESIS

Las ondas cerebrales permiten ya controlar cursores de ordenador, brazos robóticos y, pronto, todo un exoesqueleto, merced al cual un parapléjico caminará y tal vez se desenvuelva con soltura.

El envío de señales desde la rugosa corteza cerebral, para iniciar el movimiento en el exoesqueleto, constituye lo más puntero de un conjunto de técnicas bioeléctricas perfeccionadas en los últimos años.

La Copa del Mundo de 2014 en Brasil servirá de banco de pruebas para un exoesqueleto controlado desde el cerebro, si, como se espera, un adolescente discapacitado efectúa el saque de honor en la ceremonia de apertura.

nacional de Neurociencias Edmond y Lily Safra de Natal (Brasil). A este equipo internacional se sumarán algunos más en los próximos meses.

El proyecto se alza sobre cerca de veinte años de trabajos sobre interfaces cerebro-máquina en la Universidad Duke, fruto, a su vez, de estudios que se remontan a los años sesenta del siglo xx, cuando se intentó tomar señales nerviosas de cerebros animales, estudiar la posibilidad de inyectar una señal en una computadora y generar una orden que pusiera en acción un dispositivo mecánico. Desde los años noventa, y durante todo el primer decenio de nuestra centuria, quien escribe y sus colegas de Duke hemos sido precursores de una técnica que permite implantar, en cerebros de ratas y monos, centenares de hilos conductores, finos como cabellos, formando microsondas. A lo largo de estos veinte años hemos demostrado que, implantadas, las microsondas pueden detectar señales eléctricas muy débiles (potenciales de acción), generadas por unos pocos cientos de neuronas, repartidas por la corteza frontal y parietal de los animales de experimentación; las regiones mencionadas definen un vasto circuito cerebral responsable de la generación de movimientos voluntarios.

La interfaz de marras ha requerido un decenio de estudio y ensayo de señales tomadas del cerebro, experimentando con animales, con la idea de generar movimientos de brazos, manos y piernas robóticas. El año pasado se logró un avance decisivo, cuando dos monos de nuestro laboratorio aprendieron a ejercer un control neuronal de los movimientos de un brazo virtual, creado por ordenador, que no solo tocaba objetos de un mundo virtual, sino que suministraba también una realimentación «táctil artificial», directamente al cerebro de cada simio. El *software* nos permitió entrenar a los animales para sentir, al palpar un objeto con dedos virtuales controlados directamente por su cerebro.

El consorcio «Camina de nuevo», asistido por su equipo internacional de neurocientíficos, expertos en robótica o informática, neurocirujanos y profesionales de rehabilitación, ha empezado a sacar partido de esos hallazgos de la experimentación sobre animales para crear una forma completamente nueva de entrenar y rehabilitar a pacientes con graves paraplejías; también, para enseñarles a aplicar técnicas basadas en interfaces entre el cerebro y la máquina y así recuperar plena movilidad corporal. De hecho, los primeros pasitos de nuestro futuro sacador de honor se darán en una cámara de realidad virtual: una cavidad de ambiente virtual automático (CAVE, por su sigla en inglés); se trata de una sala donde tal virtualidad es proyectada sobre las paredes, el suelo y el techo. Nuestro candidato a lanzador —que necesariamente tendrá que ser un adolescente de poco peso—, provisto de unas gafas de visión tridimensional y de un casco detector de ondas cerebrales por medios no invasivos (electroencefalografía y magnetoencefalografía) se hallará inmerso en un ambiente virtual que se extiende en todas direcciones. El muchacho aprenderá a controlar los movimientos de un avatar de cuerpo entero valiéndose solo de su pensamiento. Los movimientos del avatar irán poco a poco adquiriendo complejidad, hasta terminar en movimientos finos, como caminar por terreno irregular o desenroscar la tapa de un tarro de mermelada virtual.

CONEXIÓN CON NEURONAS

Los movimientos mecánicos de un exoesqueleto no se pueden manejar tan fácilmente como los de un avatar informático, por lo que tanto la técnica necesaria como el entrenamiento habrán de resultar más complicados. El guiado de los miembros robóticos obligará a implantar electrodos directamente en el cerebro. No solo habremos de ubicar electrodos en el interior de la caja craneana, sino que será necesario aumentar también el número de neuronas, repartidas por la corteza cerebral, que habrá que «leer» simultáneamente. Muchos de tales sensores serán implantados en la corteza motora, la región del lóbulo prefrontal más directamente asociada con la generación del programa de movimientos que, en condiciones normales, se descarga en la médula espinal, cuyas neuronas controlan y coordinan directamente el trabajo de nuestros músculos. (Algunos neurocientíficos creen que esta interacción entre cerebro y músculo podrá conseguirse por medios no invasivos, como el EEG, una meta todavía lejana en la práctica.)

Gary Lehew, de mi grupo de Duke, ha ideado un sensor de nuevo tipo: un cubo de registro que, implantado, puede recoger señales de un volumen tridimensional de la corteza. A diferencia de anteriores sensores cerebrales, compuestos por matrices planas de microelectrodos, cuyas puntas reciben las señales eléctricas neuronales, el cubo de Lehew extiende microfilamentos hacia arriba, hacia abajo y hacia los lados, por toda la longitud de un eje central.

La versión actual de nuestros cubos registradores contiene hasta 1000 microhilos registradores activos. Dado que cada uno puede registrar al menos unas cuatro o seis neuronas, cada cubo podría, en principio, captar la actividad eléctrica de entre 4000 y 6000 neuronas. Suponiendo que nos fuera posible implantar varios de esos cubos en las cortezas frontal y parietal del sujeto —áreas responsables del control «de alto nivel» de movimientos y decisiones— podríamos disponer de una muestra simultánea de decenas de miles de neuronas. Según nuestro modelo teórico computarizado, tal diseño bastaría para controlar la flexibilidad de movimiento requerida por un exoesqueleto con dos piernas y devolver la ambulación autónoma a nuestros pacientes.

Para habérnoslas con la riada de datos recabados por estos sensores, estamos avanzando también hacia la construcción de una nueva generación de microcircuitos, diseñados a la medida. Implantados junto a los microelectrodos en el cráneo del paciente, permitirán extraer las órdenes en bruto necesarias para gobernar un exoesqueleto de cuerpo entero.

Evidentemente, las señales detectadas en el cerebro habrán de retransmitirse a las extremidades protéticas. Tim Hanson, que acaba de recibir el grado de doctor, ha construido en Duke un sistema de registro inalámbrico que dispone de 128 canales, equipado con sensores y chips que puede ser encajado en el cráneo y se halla capacitado para radiar las ondas cerebrales registradas hasta un receptor remoto. La primera versión de estos neurochips se está ensayando con éxito sobre monos. De hecho, hemos presenciado el primer mono que maneja, veinticuatro horas al día, una interfaz cerebro-máquina valiéndose de señales cerebrales transmitidas sin hilos. En el mes de julio del año en curso solicitamos formalmente al gobierno brasileño autorización para aplicar nuestra técnica en humanos.

En el caso del sacador de honor, los datos procedentes de los sistemas de registro se transmitirán inalámbricamente a una pequeña unidad de cómputo alojada en una mochila. En ella, varios procesadores digitales ejecutarán diversos algoritmos que traducen las señales motoras (creadas en el cerebro) en órdenes digitales aptas para controlar elementos móviles, o actuadores, repartidos por las articulaciones del traje robótico, que ajustan la posición de las extremidades artificiales del exoesqueleto.

SCIENCE & SOCIETY PICTURE LIBRARY (*pierna artificial*); CORBIS (*Paré McGroarty*)

CRONOLOGÍA

El largo camino hacia prótesis controladas desde el cerebro

Han existido, desde hace milenios, prótesis para las extremidades, una solución racional para mutilaciones de guerra, traumatismos de diverso origen y defectos congénitos. En nuestros días, la técnica ha alcanzado tal grado de refinamiento que podemos controlar un miembro artificial mediante señales eléctricas canalizadas directamente desde el cerebro.

1500-1000 a.C.
PRIMERA REFERENCIA HISTÓRICA
La literatura sacra hindú de ese período menciona a Vishpala, una guerrera mítica que perdió una pierna en una batalla. Se la sustituyeron por otra de hierro, que le permitió caminar y volver con sus tropas.

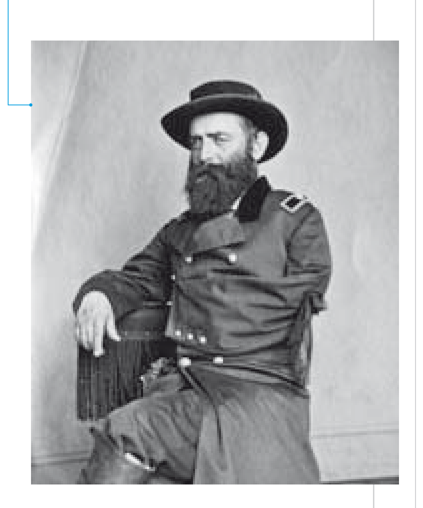


SIGLO IV a.C.
ANTIGUO ARTEFACTO
Uno de los miembros artificiales más antiguos descubiertos, del que vemos una copia, fue excavado en el sur de Italia en 1858. Debió de ser fabricado hacia 300 a.C.; era de cobre y madera; al parecer, diseñado para un amputado de rodilla.

SIGLO XIV
ARTILLERÍA Y AMPUTACIONES
La llegada de la pólvora a los campos de batalla europeos multiplicó y agravó enormemente las heridas soportadas por los soldados. En el siglo XVI, **AMBROISE PARÉ**, protocirujano de varios reyes franceses, desarrolló técnicas para sujetar extremidades, tanto superiores como inferiores, a los pacientes; reintrodujo el uso de ligaduras para taponar vasos sanguíneos.



1861-1865
GUERRA CIVIL DE EE.UU.
La guerra entre Unionistas y Confederados provocó muchas amputaciones. Uno de los afectados fue el general de brigada **STEPHEN JOSEPH MCGROARTY**, que perdió un brazo. Con la inyección de fondos gubernamentales y la disponibilidad de anestésicos, que permitían operaciones de mayor duración, mejoró en esa época la tecnología protética.





1963
INTERFAZ CEREBRAL PRIMITIVA
José Manuel Rodríguez Delgado implantó un electrodo controlado por radio en el núcleo caudado del cerebro de un toro, logrando que el animal se detuviera de repente en su embestida cuando se pulsaba el botón de un mando a distancia. Su dispositivo fue predecesor de las interfaces entre el cerebro y la máquina contemporáneas.



1969
EXPERIMENTOS PRECURSORES
En un estudio de Eberhard Fetz, de la Universidad de Washington, se entrenó a monos para activar señales eléctricas en su cerebro que controlasen la excitación de una neurona, hecho que fue registrado mediante un microelectrodo metálico.

CRONOLOGÍA

AÑOS 1980
RECEPCIÓN DE ONDAS CEREBRALES
Apostolos Georgopoulos, de la Universidad Johns Hopkins, descubrió un patrón de activación eléctrica en las neuronas motoras de macacos Rhesus, que se producía cuando los simios hacían girar su brazo en una dirección determinada.

PRINCIPIOS DE LOS NOVENTA
ELECTROIMPLANTES
John Chapin, actualmente en la Universidad de Nueva York en Downstate, y Miguel Nicolelis presentaron una técnica que permitía registrar simultáneamente docenas de neuronas muy dispersas, utilizando electrodos implantados de forma permanente, abriendo así el camino a interfaces cerebro-máquina.

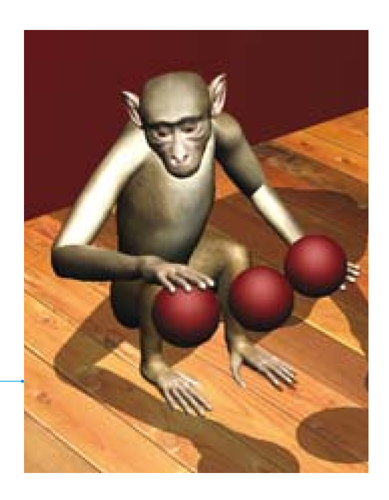


1997 PERFECCIONAMIENTO DE MOVIMIENTOS
La introducción de las prótesis de rodilla **C-LEG**, controladas por microprocesador, facultaba ahora al portador para activar una adaptación a la medida, utilizable en el ciclismo.



1999-2000 BUENA REALIMENTACIÓN
Los laboratorios Chapin y Nicolelis publicaron la primera descripción de una interfaz cerebro-máquina que operaba por la actividad de cerebros de rata; los múridos percibían el movimiento gracias a una señal de realimentación. Al año siguiente, el laboratorio de Nicolelis publicó el primer estudio en el que un mono controlaba los movimientos de un brazo robótico sirviéndose solo de su actividad cerebral.

2008-2012 OSCAR PISTORIUS
Aunque no pudo clasificarse para los Juegos Olímpicos de verano de 2008, Pistorius, apodado ***BLADE RUNNER***, barrió en los Paralímpicos de ese mismo año. En 2011, entró en las semifinales de 400 metros en los campeonatos del mundo de la Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo, en Daegu (Corea del Sur). Volvió a correr en las semifinales de 400 metros en los recientes Juegos Olímpicos de Londres.



2011 MONO PIENSA, AVATAR ACTÚA
El equipo de Nicolelis en el Centro de Neuroingeniería de la Universidad Duke demostró la capacidad que revelaba un mono al manipular los movimientos de un sosias informático, solo con su pensamiento.

2012 DE MI CEREBRO A MI BRAZO ROBÓTICO
El grupo encabezado por John Donoghue, de la Universidad Brown, demuestran con su sistema de interfaz neuronal **BRAINGATE**, que una persona dotada con su implante cerebral puede manipular un brazo robótico para recoger una bebida.



2014
SAQUE DE HONOR DE UN *CYBORG*
El laboratorio de Nicolelis se propone proporcionar un exoesqueleto a un adolescente discapacitado para que efectúe el saque de honor de los juegos de la Copa del Mundo de fútbol, en Brasil.

FUERZA MENTAL

Los comandos permitirán que el portador del exoesqueleto dé un paso después de otro, acelere o frene su marcha, se incline hacia delante o suba un tramo de escaleras. Algunos ajustes de bajo nivel del posicionamiento del *hardware* protético serán directamente gestionados por los circuitos electromecánicos del exoesqueleto, sin necesidad de señales nerviosas. Esta prenda, que recuerda al típico traje espacial, seguirá siendo flexible, y también seguirá dotando de sostén estructural a su portador; será un sucedáneo de la médula espinal. Confiamos en que, aprovechando al máximo esta interacción entre las señales de control, de origen cerebral, y los reflejos electrónicos, que proveen los actuadores, nuestra interfaz cerebro-máquina sea capaz, en sentido literal, de portar y hacer avanzar al lanzador de la Copa del Mundo por la fuerza de su voluntad.

El lanzador no solo ha de moverse, sino también sentir el suelo que pisa. El exoesqueleto reproducirá un sentido de tacto y equilibrio incorporando sensores microscópicos que, por una parte, detecten la cantidad de fuerza de cada movimiento concreto y, por otra, envíen la información del traje al cerebro. El lanzador ha de poder sentir que un dedo del pie ha entrado en contacto con el balón.

Nuestros diez años de experiencia con interfaces entre el cerebro y la máquina nos autorizan a pensar que, en cuanto el lanzador empiece a interactuar con el exoesqueleto, su cerebro comenzará a incorporar este cuerpo robótico, tomándolo como una auténtica ampliación de la imagen mental de su propio cuerpo. Mediante entrenamiento, la experiencia acumulada, obtenida por ese continuo sentirse en contacto con el suelo, y la posición de las piernas robóticas deberían posibilitar una caminata sin tropiezos por una cancha de fútbol o por una acera. Todas las fases del proyecto exigen ensayos continuos y rigurosos en experimentos sobre animales, antes de que empecemos con humanos. Además, todos los procedimientos han de ser aprobados por agencias reguladoras en Brasil, Estados Unidos y Europa, para garantizar su adecuado cumplimiento de las exigencias científicas y éticas. Pero, a pesar incluso del escaso tiempo disponible para la realización de su primera demostración pública, la simple idea de alcanzar tan alta meta ha electrizado a la sociedad brasileña relacionada con la ciencia como muy pocas veces ha ocurrido.

CORTESÍA DE OTTO BOCK HEALTHCARE (*pierna artificial*); ANDREW MEDICHINI, AP PHOTO (*Pistorius*); CORTESÍA DE MIGUEL A. L. NICOLELIS (*avatar de mono*); CORTESÍA DE BRAINGATE2.ORG (*BrainGate*)

MANDO A DISTANCIA

El saque de honor en la Copa del Mundo —o si por cualquier razón no llegamos a tiempo con el proyecto, en un acontecimiento similar; por ejemplo, los Juegos Olímpicos y Paralímpicos de Río de Janeiro, en 2016— será más que una hazaña esporádica. Nos haremos una idea de las posibilidades de esta técnica si traemos a colación un experimento bifásico ya realizado con monos. Como preludio, nuestro equipo de investigación de la Universidad Duke, allá por 2007, entrenó a monos Rhesus a caminar erectos por una cinta, mientras se registraba simultáneamente la actividad eléctrica de más de 200 neuronas corticales. En el ínterin, Gordon Cheng, que pertenecía entonces a los Laboratorios ATR de Robótica y Comunicación Inteligente, en Kyoto, construyó un protocolo de Internet extraordinariamente rápido que permitió enviar esa riada de datos neuronales directamente a Kyoto, donde alimentó los controles electrónicos de CB1, un robot humanoide. En la primera fase de ese experimento intraplanetario, Cheng y mi grupo de Duke demostraron que los mismos algoritmos informáticos desarrollados con anterioridad para traducir pensamientos en órdenes de control de brazos robóticos permitían también la conversión de pautas de actividad neuronal implicadas en la locomoción bípeda para hacer caminar a dos piernas mecánicas.

La segunda fase del experimento fue causa de mucha mayor sorpresa. Mientras una de nuestras monas, Idoya, caminaba por la cinta en Durhan (Carolina del Norte), nuestra interfaz cerebro-máquina transmitió un flujo constante de su actividad eléctrica cerebral hasta Kyoto, gracias a la conexión de Internet creada por Gordon. Allí, el robot CB1 detectó estas órdenes motoras y comenzó a caminar también, casi inmediatamente. Al principio fue necesario sostener a CB1 por la cintura, pero en experimentos posteriores comenzó a moverse de forma autónoma en respuesta a las órdenes tomadas del cerebro de la mona, generadas en el otro lado del globo terrestre.

Lo que es más, incluso cuando la cinta de Duke se detuvo e Idoya dejó de caminar, todavía podía controlar los movimientos de las piernas de CB1 sin más que observar los movimientos del robot en un vídeo retransmitido en directo, imaginando cada paso que CB1 debería dar. Idoya continuó produciendo las pautas cerebrales necesarias para seguir haciendo caminar a CB1, a pesar de que su propio cuerpo ya no estaba implicado en tareas motoras. La demostración de esa interfaz cerebro-máquina transcontinental reveló la posibilidad real de que un humano, o un simio, trascienda el espacio y la fuerza, libere las órdenes que su cerebro genera de los límites físicos del cuerpo que lo alberga y las transmita hasta un dispositivo de creación humana situado a mucha distancia del pensamiento original que engendró la acción.

Estos experimentos conllevan que las interfaces cerebro-máquina podrían permitir la manipulación de robots enviados a ambientes donde un humano jamás podría penetrar directamente: nuestros pensamientos podrían operar un instrumento microquirúrgico en el interior del cuerpo, por ejemplo, o dirigir la actividad de un operario humanoide que reparase una fuga en una central nuclear.

La interfaz podría, asimismo, controlar herramientas que ejerzan fuerzas mucho mayores, o mucho más livianas, de lo que nuestros cuerpos son capaces, liberando así de las limitaciones ordinarias la cantidad de fuerza que un individuo puede desarrollar. La vinculación de un cerebro de mono con un robot humanoide se ha realizado ya, con las limitaciones que impone el crono: el viaje mental de Idoya alrededor del mundo exigió 20 milisegundos, menos del tiempo requerido para que ella moviera su propia extremidad.

Además de inspirarnos visiones del futuro lejano, el trabajo realizado con estos monos nos hace confiar en la viabilidad de nuestro plan. En el momento de escribir, nuestra propuesta ha sido respaldada y abrazada con orgullo por mi país natal. El Gobierno brasileño autorizó en julio pasado que un adulto parapléjico joven participase en la ceremonia de apertura del partido inaugural de la Copa del Mundo de 2014. Estamos esperando ahora a que la FIFA, responsable de la organización de la ceremonia, nos conceda también su visto bueno.

Abundan las dificultades burocráticas y las incertidumbres científicas para que nuestra visión se materialice. Mas no puedo dejar de imaginar cómo irá todo durante esa fugaz, pero histórica andadura por un campo de fútbol, verde y tropical, mientras tres mil millones de personas presencien cómo un joven brasileño vuelve a caminar por propia volición y acaba dando un puntapié a un balón: un gol inolvidable para la ciencia, en esa tierra brasileña, que tan bien domina el hermoso juego llamado fútbol.

PARA SABER MÁS

Control cerebral de robots. Miguel A. L. Nicolelis y John K. Chapin en *Investigación y Ciencia*; n.º 315, págs. 6-14, diciembre de 2002.
Cortical control of a prosthetic arm for self feeding. Meel Velliste et al. en *Nature*, vol. 453, págs. 1098-1101, 19 de junio de 2008.
Beyond boundaries: The new neuroscience of connecting brains with machines and how it will change our lives. Miguel Nicolelis. St. Martin's Griffin, 2012.

TECNOLOGÍA

Las fronteras de la ambición

Diez proyectos que ensanchan los límites de la ingeniería

Selección de Dave Mosher

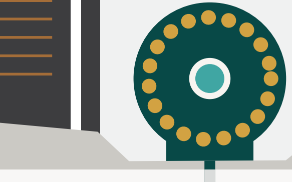


TRABAJOS EN DELTAS

La mayor estructura mundial de contención del agua no es una presa, sino toda una red. Más de 16.000 kilómetros de diques, canales y, por supuesto, de presas protegen los Países Bajos del mar del Norte. Su construcción duró medio siglo, pero la elevación del nivel del mar resultante del cambio climático exige que los ingenieros holandeses trabajen continuamente en ese proyecto para que el agua no inunde su país.

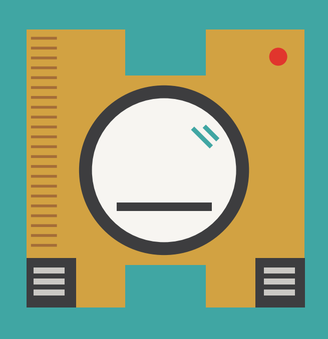
UNA TUMBA MUY SEGURA

El mayor sepulcro del mundo desde las Pirámides de Giza en 2560 a.C. pronto encerrará los restos de la central nuclear de Chernobil. Para que la radiación sobre los obreros sea mínima, se construirá un arco de acero de 120 metros de altura y 32.000 toneladas de peso a unos 300 metros del reactor, que después se trasladará sobre rodamientos de teflón a su emplazamiento. Cuando esté terminado en 2015 será la mayor estructura móvil del mundo.



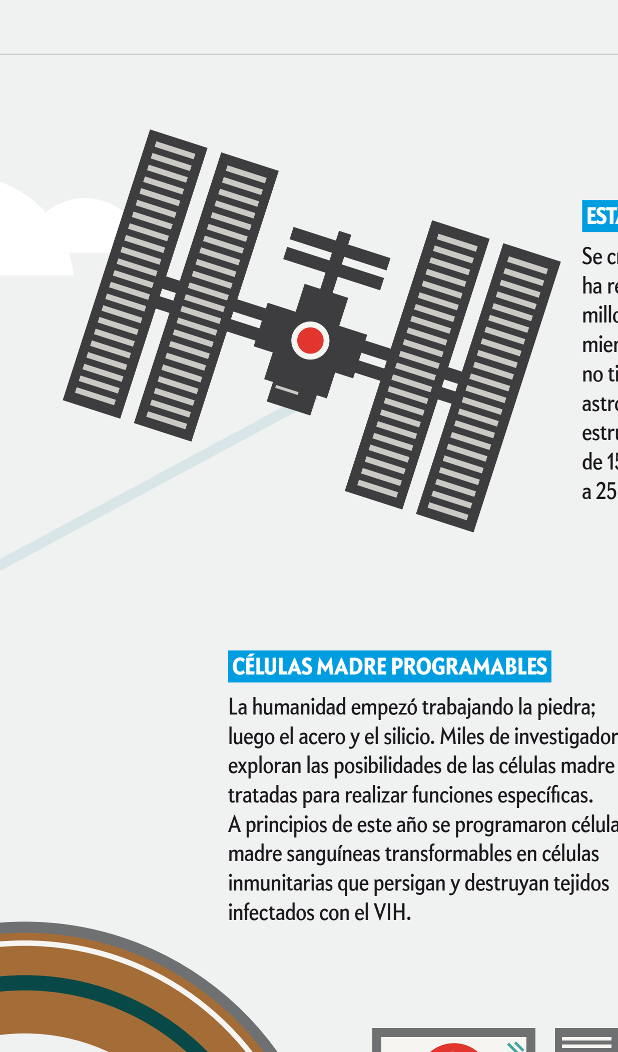
PROCESADORES NEURONALES

Los microprocesadores actuales no son aptos para la comparación de patrones (por ejemplo, el reconocimiento de un rostro). IBM está desarrollando procesadores «neuronales», que imitan la flexible disposición de las neuronas en el cerebro de los animales. En lugar de separar las unidades de tratamiento y de memoria, estos microcircuitos integran ambas funciones de tal modo que los procesadores puedan aprender de los datos que reciben. El primero de ellos ha aprendido a jugar al pimpón.



SUBMARINO TRITON 36000/3

El cineasta James Cameron solo pudo atisbar la profundidad oceánica a través de una pequeña claraboya cuando a principios de año descendió a la fosa de las Marianas. Pero el fabricante Triton Submarines está preparando un sumergible de idéntica capacidad, con visión panorámica de 360 grados. Se trata de una concha esférica enteramente de vidrio resistente a las altas presiones, y en aguas profundas pueden gobernarla hasta tres personas mediante controles de fibra óptica que atraviesan el vidrio.





ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

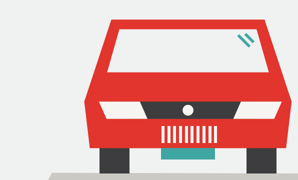
Se critica que este laboratorio ni con mucho ha recuperado en valor científico los 100.000 millones de dólares que costara su establecimiento. Pero como maravilla de ingeniería no tiene rival. Paseando por el espacio, los astronautas han ensamblado 40 grandes estructuras en un palacio extraterrestre de 15 habitaciones que surca los cielos a 25.000 kilómetros por hora.

ESPÍAS MICRORROBÓTICOS

El Departamento de Defensa de EE.UU. ha tardado cinco años en construir un robot parecido a un colibrí, que despliega sus alas para volar. Presentado en 2011, este ingenio es capaz de tomar vídeos en directo y transmitirlos a centros de espionaje en otros continentes vía satélite. Otros investigadores han creado robots inalámbricos, no mayores que moneditas, que remedan un enjambre de abejas.

CÉLULAS MADRE PROGRAMABLES

La humanidad empezó trabajando la piedra; luego el acero y el silicio. Miles de investigadores exploran las posibilidades de las células madre tratadas para realizar funciones específicas. A principios de este año se programaron células madre sanguíneas transformables en células inmunitarias que persigan y destruyan tejidos infectados con el VIH.



LA MINA DE ORO MPONENG

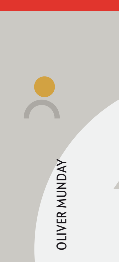
El oro ya no está en los montes sino muy sepultado bajo tierra. Para alcanzarlo, la minera sudafricana AngloGold Ahsanti tuvo que excavar hasta más de tres mil metros, lo que convierte a Mponeng en la mina más profunda del mundo. A tal profundidad las rocas se mantienen a 78 grados centígrados durante todo el año, y hay que inyectar hielo molido por tuberías metálicas para que la temperatura ambiente descienda a menos de 47 grados y los trabajadores lo resistan.

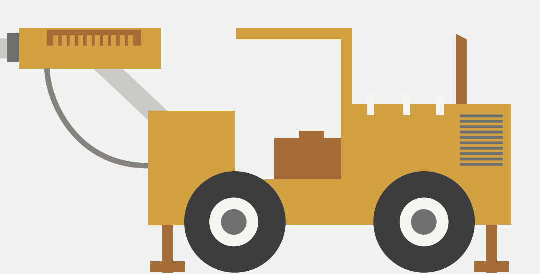
INTERNET

La Internet global, tan invisible y esencial como el aire, constituye la hazaña de ingeniería más importante de la historia moderna.

ROBOT DE RESISTENCIA

En colaboración con la NASA se ha diseñado un robot nadador capaz de explorar los enormes lagos ocultos bajo las capas de hielo antárticas. Esta máquina es un primer ensayo de los robots que algún día sondearán los peligrosos y lejanos mares que cubre el helado casquete del satélite de Júpiter Europa.





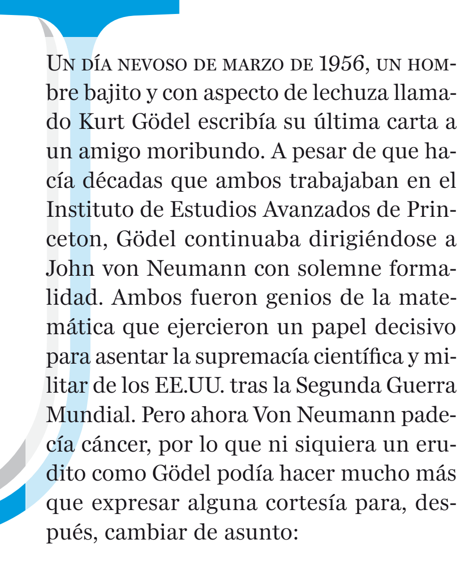
OLIVER MUNDAY

COMPLEJIDAD

Máquinas del infinito

Que una máquina pueda o no responder con rapidez a preguntas cuya respuesta es «sí» o «no» entraña consecuencias que afectan a ámbitos diversos, desde la seguridad nacional a los límites de lo cognoscible

John Pavlus



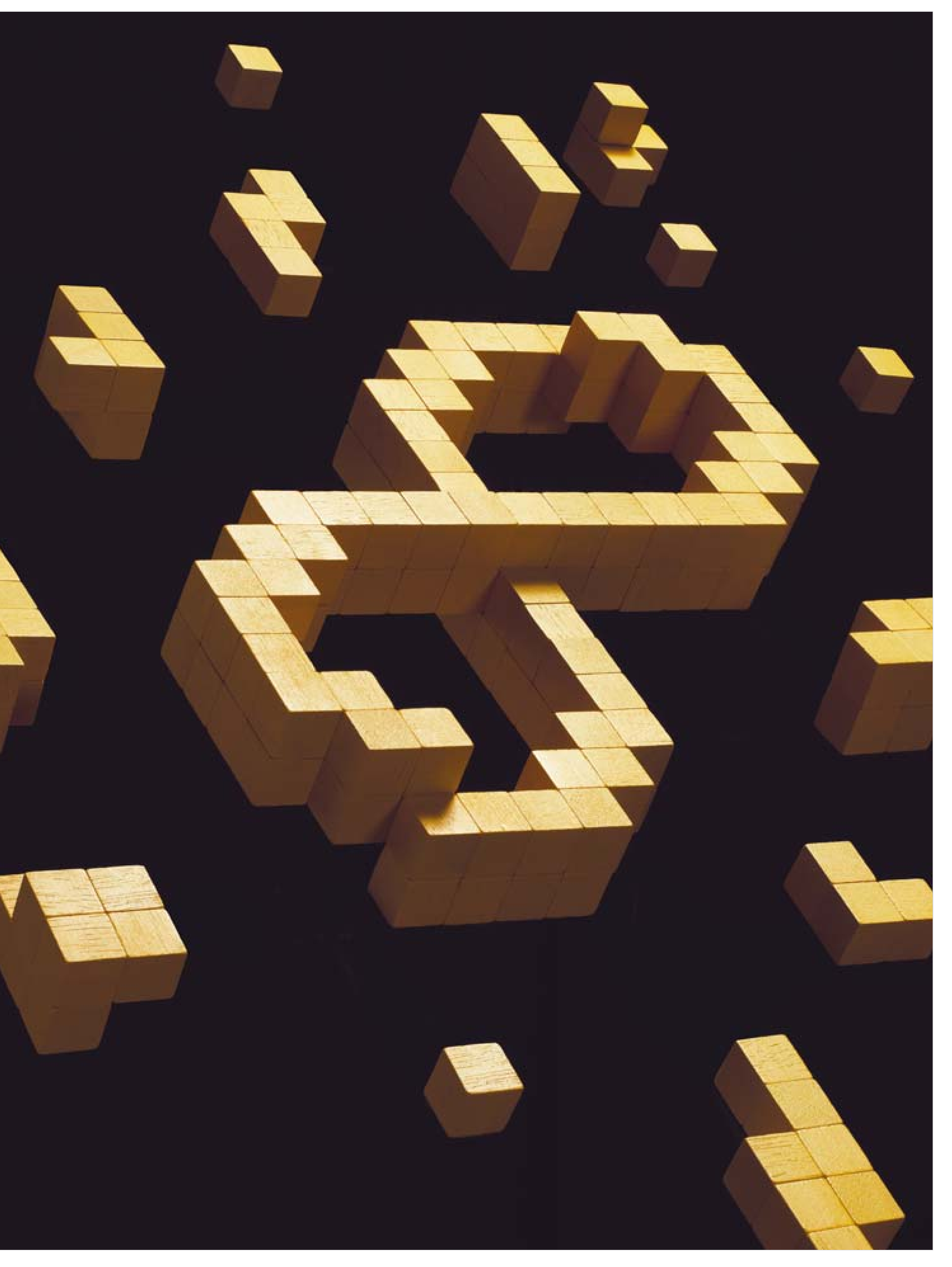
Un día nevoso de marzo de 1956, un hombre bajito y con aspecto de lechuza llamado Kurt Gödel escribía su última carta a un amigo moribundo. A pesar de que hacía décadas que ambos trabajaban en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Gödel continuaba dirigiéndose a John von Neumann con solemne formalidad. Ambos fueron genios de la matemática que ejercieron un papel decisivo para asentar la supremacía científica y militar de los EE.UU. tras la Segunda Guerra Mundial. Pero ahora Von Neumann padecía cáncer, por lo que ni siquiera un erudito como Gödel podía hacer mucho más que expresar alguna cortesía para, después, cambiar de asunto:

> *Estimado Sr. Von Neumann:*
>
> *Con gran pesar he sabido de su enfermedad. [...] Ha llegado a mis oídos que durante los últimos meses ha sido usted sometido a un tratamiento radical. Me alegra que dicha cura haya surtido el éxito deseado y que, en estos momentos, se encuentre usted mejor. [...]*
>
> *Dado que ahora, como se me cuenta, se siente usted más fortalecido, me gustaría permitirme la licencia de escribirle acerca de cierto problema matemático sobre el que me interesaría enormemente conocer su opinión. [...]*

El problema que a continuación expone Gödel resulta ininteligible para los no matemáticos —de hecho, quizá fuese un intento de distraer a Von Neumann haciéndole partícipe de una conversación especializada—. Gödel se preguntaba acerca del tiempo que una máquina hipotética tardaría en resolver cierta clase de problemas. El desenlace parece extraído de un texto de ciencia ficción:

> *Si realmente existiese una máquina así [...] las consecuencias serían de la máxima importancia. En particular, resulta evidente que*


KYLE BEAN (*diseño*); RYAN HOPKINSON (*fotografía*); KYLE BEAN (*ilustración*)





John Pavlus es escritor y cineasta especializado en temas científicos y tecnológicos. Sus trabajos han aparecido en *Wired, Nature* y *Technology Review*, entre otras publicaciones.

EN SÍNTESIS

El «problema P-NP» plantea la pregunta de si todos los problemas cuya solución puede verificarse con rapidez (NP) admiten también un método que permita encontrar la solución en poco tiempo (P).

Hasta ahora nadie ha conseguido probar que ambas clases de problemas sean diferentes. Si se demostrase que no lo son, la potencia de los ordenadores aumentaría de manera asombrosa.

El problema no solo afecta a la criptografía o a las búsquedas por Internet; sugiere limitaciones fundamentales en las leyes físicas, la evolución y la naturaleza del conocimiento.

ello significaría que [...] la actividad mental de un matemático en lo que se refiere a las preguntas cuya respuesta es «sí» o «no» podría ser completamente reemplazada por una máquina.

Por «actividad mental» Gödel no se refería a cálculos triviales del estilo de sumar 2 y 2. Hablaba de los saltos intuitivos que permiten a un matemático alumbrar nuevas áreas del conocimiento. Veinticinco años atrás, los hoy famosos teoremas de incompletitud de Gödel habían transformado la matemática para siempre. ¿Podría construirse una máquina que, a petición nuestra, llegase a resultados de una profundidad tan revolucionaria?

Pocas semanas después de que Gödel enviase su carta, Von Neumann ingresaba en el Hospital Militar Walter Reed de Washington, donde fallecería meses después. Von Neumann jamás contestó a su amigo, pero el problema les sobreviviría a ambos. La cuestión que planteaba Gödel, hoy denominada problema P-NP, se ha convertido en un principio organizador de la informática moderna. A partir de ella se ha gestado un área de investigación enteramente nueva: la teoría de la complejidad computacional. En ella concurren la ingeniería, la matemática y otras ciencias con la finalidad de determinar, con total certeza, qué es lo que un ordenador puede y no puede hacer bajo circunstancias realistas.

Pero el problema de la relación entre las clases de complejidad P y NP trasciende con mucho los artilugios de plástico y silicio que hemos dado en llamar ordenadores. Sus implicaciones afectan a áreas como la física, la biología molecular, la evolución, la criptografía o la seguridad nacional; también a los límites de la matemática y, quizás, a la naturaleza de la realidad. Por sí sola, la cuestión establece las fronteras de lo que, en teoría, podremos llegar a calcular algún día. Y, en el siglo XXI, los límites de la computación se asemejan cada vez más a los límites del conocimiento humano.

LA APUESTA

En 1975 Michael Sipser era todavía un estudiante de doctorado, pero sabía que alguien resolvería pronto el problema P-NP. Incluso llegó a pensar que tal vez lo lograse él mismo. Corría el otoño de ese año cuando discutía la cuestión con Leonard Adleman, también doctorando en el departamento de ciencias de la computación de la Universidad de California en Berkeley. «El problema P-NP me fascinaba y, en cierta manera, creía poder entenderlo de un modo que iba más allá de cómo lo afrontaban los demás», reconoce Sipser, hoy director del departamento de matemáticas del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Tan seguro estaba de sí mismo que, aquel día, apostó con Adleman una onza de oro puro a que el problema P-NP sería resuelto a lo más tardar a finales del siglo XX.

La apuesta de Sipser no carecía de cierto trasfondo poético, ya que el problema P-NP trata precisamente sobre la rapidez con la que pueden resolverse otros problemas. Hay ocasiones en las que seguir a pies juntillas una serie de instrucciones basta para llegar a la solución con relativa rapidez. Piense en la lista de la compra: los artículos se van tachando uno a uno y, en cierto momento, hemos terminado. En teoría de la complejidad estos problemas se denominan de tipo P. El nombre procede de «tiempo polinómico», el término que emplean los matemáticos para expresar que, por larga que sea la lista, el tiempo necesario para tachar todos los elementos no crecerá a un ritmo desenfrenado.

Por otro lado, existen problemas para los que, con independencia de que puedan reducirse o no a tachar elementos de una lista, resulta muy sencillo comprobar que una solución dada es correcta. Piense en un puzle: ensamblar todas sus piezas quizá lleve tiempo; pero, una vez completado, basta con mirarlo para saber de inmediato si ha sido bien armado o no. En teoría de la complejidad, los problemas cuya solución se deja verificar con rapidez se dicen de tipo NP.

Cuatro años antes de la apuesta de Sipser, el matemático Stephen Cook había hallado una relación entre estas dos clases de problemas. Cook demostró que todo problema a cuya solución se llega en poco tiempo (de tipo P) es también uno cuya solución puede verificarse con rapidez (de tipo NP). La pregunta que desde entonces nadie ha conseguido responder es la que hace referencia al enunciado inverso: si un problema es tal que su solución puede verificarse con rapidez, ¿pertenece entonces a la clase de problemas que se dejan resolver en un tiempo razonable? De manera intuitiva, todos responderíamos que no. A fin de cuentas, reconocer que un puzle ha sido bien armado parece algo muy distinto del proceso de ensamblar todas las piezas. En otras palabras, no parece que P sea igual a NP.

Lo que asombraba a Sipser era que nadie hubiera sido capaz de demostrar una observación de apariencia tan obvia. Pero, a falta de una prueba, siempre quedaba la posibilidad —por extraña e incomprensible que pareciese— de que todo problema NP pudiese reformularse en términos de algún problema de tipo P. Y, dado que una computadora puede resolver con rapidez cualquier problema de clase P, que P y NP fuesen iguales implicaría que la capacidad de cálculo de los ordenadores excedería con mucho lo que habíamos imaginado. En tal caso, vendrían a ser lo que Gödel describía en su carta: oráculos mecánicos con capacidad para responder a casi cualquier pregunta, siempre y cuando pudieran programarse para verificar que la solución es correcta. Sipser sabía que un resultado así se antojaba harto improbable. Sin embargo, demostrar la proposición contraria (que P no es igual a NP, en apariencia mucho más verosímil) se ha revelado una tarea temible.

Así como los teoremas de incompletitud de Gödel pusieron de manifiesto que la matemática debía contener proposiciones verdaderas pero indemostrables, una demostración de que P no es igual a NP revelaría una verdad objetiva sobre los límites del conocimiento: que armar un puzle y reconocer que el resultado es el correcto constituyen dos tareas de diferente naturaleza. Por tanto, por más potencia de cálculo que lograsen los ordenadores futuros, no existirían atajos en nuestro camino hacia el conocimiento.

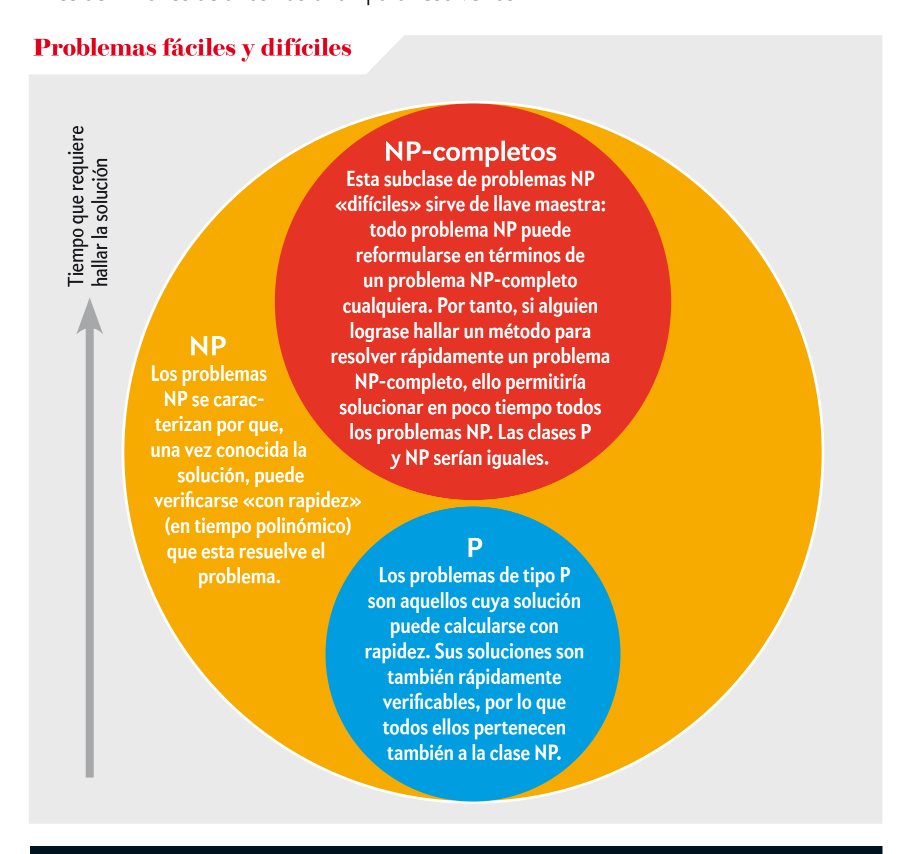
Siempre resulta difícil demostrar una negación. Pero Gödel lo había logrado. Por ello, en 1975 Sipser pensó que disponía de tiempo de sobra para ganar la apuesta con Adleman. Y si él no conseguía dar con la demostración, algún otro lo haría y aún podría cobrar su onza de oro.

FUNDAMENTOS

Clases de complejidad

«¿Cuánto tiempo tardaremos en resolver este problema?» Esta es la pregunta que se hacen los investigadores cuando clasifican los problemas con arreglo a su complejidad de computación. Imaginemos que deseamos ordenar una lista de números de mayor a menor. A medida que la lista crece, ordenarlos llevará más tiempo, pero dicho tiempo aumenta a un ritmo «manejable». Decimos que un problema tal pertenece a la clase P, ya que puede resolverse en «tiempo polinómico»: el tiempo necesario será, como mucho, proporcional a una potencia de la cantidad inicial de datos. Pero resolver otras cuestiones requiere un tiempo que aumenta a un ritmo mucho mayor. En algunos casos, como ocurre con ciertos problemas NP-completos, ni siquiera billones de procesadores que calculasen durante miles de millones de años bastarían para resolverlos.

Problemas fáciles y difíciles



COMPLICACIONES CRECIENTES

Aunque no era partícipe de su confianza, Adleman compartía la fascinación de Sipser a causa de cierta pista que figuraba en el artículo de Cook. En él no solo se demostraba que todos los problemas de tipo P pertenecían a la clase NP; sino que, entre estos últimos, existía un subtipo de problemas muy especiales: los NP-completos. Estos vendrían a ser como un juego de llaves maestras: en caso de descubrir un algoritmo que permitiese resolver con rapidez uno de ellos, ese mismo algoritmo permitiría dar con un método para solucionar rápidamente cualquier otro problema de tipo NP. Por tanto, en caso de encontrarlo, quedaría demostrado que P es igual a NP.

Dicha estrategia solo adolecía de un inconveniente: los problemas NP-completos figuran entre los más complicados de la historia de la computación. Además, una vez descubiertos, empezaron a surgir en todo tipo de situaciones. Poco después de que apareciese el artículo de Cook, uno de los profesores de Adleman en Berkeley, Richard M. Karp, publicó un artículo, muy conocido desde entonces, en el que demostraba que 21 problemas clásicos de computación eran NP-completos. Pronto se les sumaron decenas y centenares de ellos: programar los horarios de los vuelos, colocar las cajas de mercancía en un camión, resolver sudokus, diseñar microcircuitos, distribuir a los invitados de una boda, jugar al Tetris y miles de problemas cotidianos más. Todos ellos han demostrado ser NP-completos.

¿Cómo podía esa llave maestra, tan tentadora para hallar la relación entre las clases P y NP, ser al mismo tiempo tan común y tan indescifrable? «Eso fue lo que me atrajo hacia el problema P-NP», explica Adleman, hoy investigador en la Universidad de California del Sur. «La potencia y el alcance de esos problemas se antojaba de una profundidad formidable. Pero no los entendíamos. Y no parece que vayamos a entenderlos pronto.» (El pesimismo de Adleman acabó convertido en innovación mundial. A los pocos años de su apuesta con Sipser, Adleman

APLICACIONES

El problema del viajante sueco

Si en su próximo viaje a Suecia no quiere perderse nada, siga la ruta trazada aquí. Representa el trayecto más corto posible que recorre los 24.978 municipios, pueblos y aldeas del país escandinavo. Se espera que las técnicas desarrolladas para resolver este problema, que mejoran el algoritmo de «fuerza bruta» (comparar sin más todos los caminos posibles), sean de utilidad en el diseño de microcircuitos o en la secuenciación de genomas.

DAVID APPLEGATE, AT&T LAB.; ROBERT BIXBY, UNIVERSIDAD RICE; VASEK CHVATAL, UNIVERSIDAD CONCORDIA Y WILLIAM J. COOK, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE GEORGIA

y sus colaboradores Ronald Rivest y Adi Shamir explotaron la aparente inmensidad de los problemas P y NP para crear el algoritmo de cifrado RSA, hoy empleado para las operaciones bancarias en línea, las comunicaciones y los asuntos de seguridad nacional.)

La característica principal de los problemas NP-completos reside en que la cantidad de cálculos que deben realizarse para resolverlos aumenta a un ritmo abrumador a medida que crece el tamaño del problema. Imagínese que está planificando un viaje por Europa. Usted se ha propuesto visitar ciertas ciudades, por lo que desea hallar una ruta que pase por todas y cada una de ellas pero que, al mismo tiempo, minimice la distancia recorrida. El método más directo consistiría en considerar todos los itinerarios posibles y comparar su longitud. Si se propone visitar 5 ciudades, solo deberá examinar 120 rutas; pero, si fuesen 10, el número de caminos posibles ascendería a más de tres millones y medio. Y si quisiera visitar 60 ciudades, las posibilidades superarían el número de átomos en el universo observable. Esta pesadilla informática se conoce como problema del viajante. Tras 80 años de intenso estudio, nadie ha dado con un método general que permita resolverlo en un tiempo razonable.

En ello reside el carácter perverso de los problemas NP-completos: dejando a un lado los casos más sencillos, no solo resultan todos igualmente imposibles de resolver (por más que dispusiésemos de un ordenador con una memoria casi divina que calculase durante un tiempo igual a la edad del universo), sino que aparecen en todo tipo de situaciones. De hecho, los problemas NP-completos no solo traen de cabeza a los informáticos, sino que parecen imponer límites a la misma naturaleza.

EL CÓDIGO DE LA NATURALEZA

Edsger Dijkstra, conocido por sus aportaciones a los lenguajes de programación, comprendió que los problemas de teoría de la computación trascendían el ámbito de la matemática: «La computación no guarda más relación con los ordenadores que la astronomía con los telescopios», sentenció una vez. La capacidad para computar no se limita a las creaciones de Google o Intel. En realidad, cualquier sistema que transforme un conjunto de datos de entrada en otros de salida por medio de una serie finita de reglas —incluidas las de la física o la biología— puede considerarse que realiza un cómputo.

En 1994, el matemático Peter Shor demostró que un dispositivo que manipulase con ingenio partículas subatómicas podría emplearse para descodificar los sistemas modernos de cifrado de datos. En 2002, Adleman se valió de cadenas de ADN para hallar una solución óptima a un ejemplo del problema del viajante [*véase* «Computación con ADN», por L. M. Adleman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1998]. Y, en 2005, Scott Aaronson, experto en computación cuántica que hoy trabaja en el Laboratorio de Inteligencia Artificial y Ciencias de la Computación del MIT, empleó nada menos que pompas de jabón para «calcular» soluciones óptimas al problema del árbol de Steiner (el grafo de longitud mínima que conecta una serie de puntos). Esa es la clase de problemas NP contra los que se estrellan los ordenadores. ¿Acaso saben

esos sistemas naturales algo que las computadoras modernas ignoran?

«Por supuesto que no», asegura Aaronson. Su experimento con pompas de jabón no supuso sino una reducción al absurdo de la pretensión de que un sistema físico sencillo pudiese trascender la diferencia entre los problemas de tipo P y los de tipo NP. En algunos casos, las burbujas de jabón «calcularon» el árbol de Steiner mínimo, pero comenzaron a fallar con rapidez en cuanto el tamaño del problema fue en aumento, tal y como le ocurre a un ordenador. Las cadenas de ADN de Adleman tropezaron con la misma piedra. Y aunque el algoritmo cuántico de Shor funcione en todos los casos, existe el convencimiento generalizado de que el problema de factorización que resuelve no es NP-completo; por tanto, no proporcionará la clave para solucionar todos los problemas de tipo NP. La biología, la física clásica y la mecánica cuántica parecen respaldar la idea de que los problemas NP-completos no admiten atajos. Ello parece respaldar la idea de que P no es igual a NP.

«Por supuesto que aún no podemos demostrarlo, pero si fuéramos físicos en lugar de teóricos de la complejidad, hace ya tiempo que habríamos elevado el enunciado "P no es igual a NP" a la categoría de ley de la naturaleza, algo tan cierto como que nada se mueve más rápido que la luz», apostilla Aaronson. De hecho, algunas propuestas sobre la naturaleza última del espaciotiempo, como el principio holográfico [*véase* «La información en el universo holográfico», por J. D. Bekenstein; Investigación y Ciencia, octubre de 2003], parecen sugerir una descripción de la realidad basada en bits. Por tanto, puede que la dificultad en apariencia irreducible de algunos problemas de tipo NP —y las limitaciones al conocimiento que ello impone— se halle grabada en los entresijos más profundos de la naturaleza.

MAQUINARIA CEREBRAL

Si el propio universo se halla sometido a tales límites computacionales, ¿cómo es posible que ciertos problemas NP-completos se vean resueltos constantemente, aun cuando calcular la solución llevaría billones de años?

Consideremos la gestación de un feto humano. Sus conexiones cerebrales enlazan miles de millones de neuronas. Determinar la disposición óptima de esas células supone un problema NP-completo, pero la evolución parece haberlo resuelto. «La conexión entre una neurona y un manojo de puntos sinápticos constituye un problema de optimización de grafos que es del tipo NP-duro [una clase de problemas al menos tan difíciles como los NP-completos]», explica Mark Changizi, neurobiólogo evolutivo. Sin embargo, el cerebro no da con la solución: se conforma con una aproximación razonable. De hecho, las neuronas adoptan de manera sistemática una disposición óptima con un margen del 3 por ciento. A pesar de los miles de millones de generaciones sobre las que ha actuado la selección natural, el gusano *Caenorhabditis elegans*, que posee solo 302 neuronas, aún no ha llegado a desarrollar un diagrama perfecto de conexiones neuronales. Changizi opina que la evolución se halla constreñida por los límites que impone la relación entre P y NP. «Pero funciona de todos modos, porque la vida no exige siempre la perfección para seguir adelante», concluye.

Lo mismo sucede con los ordenadores. La capacidad de las máquinas modernas para llevar a término tareas de todo tipo demuestra que los problemas de clase P abarcan una gran parte de nuestras necesidades de computación. Para el resto, suele bastar con un algoritmo de aproximación. De hecho, tales algoritmos se emplean para resolver problemas extraordinariamente complejos de búsqueda y comparación de patrones. La solución a la que se llega no siempre coincide con la óptima, pero no por ello dejan de resultar útiles.

Tomemos Google como ejemplo. Numerosos expertos consideran que los problemas NP corresponden, en esencia, a problemas de búsqueda. Pero su director de investigación, Peter Norvig, afirma que la compañía se esfuerza por evitar tales problemas: «Los usuarios prefieren la rapidez a la perfección». Por ello, Google optimiza sus algoritmos hacia una clase de complejidad computacional más veloz aún que P (denominada «tiempo lineal»), de tal manera que los resultados de una búsqueda aparezcan casi al instante. ¿Y si surgiese un problema que no se deja resolver de ese modo? «Lo reformularíamos para que fuese más fácil, o lo dejaríamos de lado», sentencia.

Así se resume el legado y la ironía de la relación entre las clases P y NP. Al escribir a Von Neumann en 1956, Gödel creía que el problema prometía un futuro lleno de máquinas infalibles que reemplazarían «la actividad mental de un matemático» y que hallarían nuevas verdades sin más que pulsar una tecla. En su lugar, largos años de estudio para elucidar la relación entre P y NP han servido para erigir un mundo en el que las máquinas han mejorado su capacidad de cómputo, pero aceptando al mismo tiempo sus limitaciones. Un enfoque basado en los sistemas vivos, y no en la perfección mecanicista, es lo que permite a los coches sin conductor de Google circular por las congestionadas calles de Las Vegas o al superordenador Watson de IBM competir contra humanos en un programa de televisión.

LA QUIMERA DEL ORO

El año 2000 llegó, de modo que Sipser hubo de enviar a Adleman su onza de oro. Justo ese año, el Instituto de Matemáticas Clay decidió ofrecer un premio de un millón de dólares a la primera persona que solucionase el problema P-PN. El premio ayudó a consolidar la importancia de la cuestión, pero también atrajo a multitud de aficionados de poca monta. Sipser, como muchos otros teóricos de la complejidad, recibe de manera regular correos electrónicos en los que se le solicita revisar una supuesta demostración de que P no es igual a NP. O peor aún: lo contrario.

Hoy la relación entre las clases de complejidad P y NP continúa sin esclarecerse, pero numerosos expertos creen que el problema cederá algún día. Sipser asegura que nunca ha tirado la toalla: de vez en cuando, toma lápiz y papel y le da vueltas al asunto; casi por divertimento, como un perro que roe su hueso preferido. Al fin y al cabo, el propio problema P-NP pertenece a la clase NP. Puede que nunca hallemos la respuesta, pero, si algún día aparece, lo sabremos cuando la veamos.

PARA SABER MÁS

La eficiencia de los algoritmos. Harry R. Lewis y Christos H. Papadimitriou en *Investigación y Ciencia*, n.º 18, marzo de 1978.

The history and status of the P versus NP question. Michaell Sipser en *Proceedings of the twenty-fourth annual ACM symposium on theory of computing*, págs. 603-618, 1992.

Los límites de la razón. Gregory Chaitin en *Investigación y Ciencia*, n.º 356, mayo de 2006.

Los límites de la computación cuántica. Scott Aaronson en *Investigación y Ciencia*, n.º 380, mayo de 2008.

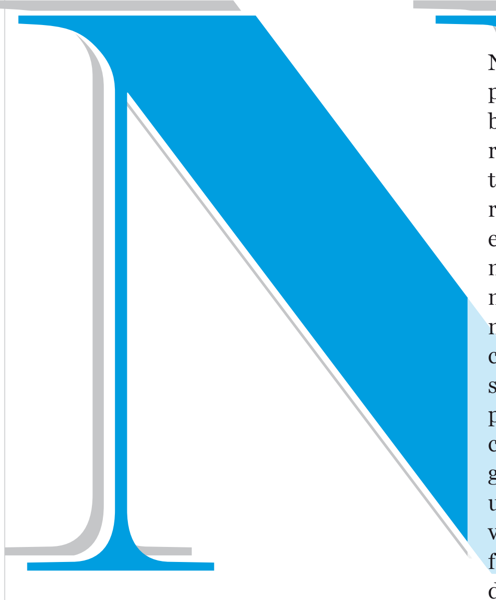
P = NP. Agustín Rayo en *Investigación y Ciencia*, n.º 403, abril de 2010.

SALUD

Retos de la medicina regenerativa

Estimular la regeneración de tejidos, ralentizar el envejecimiento, reparar lesiones y traumatismos o generar órganos en el laboratorio son algunas de las promesas de esta estrategia biomédica

María José Barrero y Juan Carlos Izpisúa Belmonte



No cabe duda de que en este siglo nos esperan grandes avances en el campo de la biomedicina. La historia de la medicina regenerativa se remonta a los primeros trasplantes de órganos realizados durante los años cincuenta del siglo XX. Sin embargo, hoy en día los factores que limitan esta práctica siguen siendo los mismos: la escasa disponibilidad de donantes de órganos compatibles con el paciente. Por fortuna, en los últimos años se han realizado numerosos logros en importantes disciplinas científicas, como la computación, los biomateriales y la bioingeniería, que nos permiten vislumbrar en un futuro próximo la posibilidad de llevar a cabo estrategias para solventar la falta de tejidos. Pero ¿qué terapias hay disponibles actualmente en el ámbito de la medicina regenerativa y cuáles llegarán en los años venideros? ¿Qué limitaciones se deben superar para aplicar a la práctica clínica el conocimiento adquirido en el laboratorio?

La edad avanzada, las enfermedades y los traumatismos son las causas más habituales que llevan al fallo de órganos y tejidos. Dependiendo de la causa, el tipo de tejido dañado y la extensión de la lesión, podrían aplicarse diferentes estrategias reparadoras. El envejecimiento conlleva la pérdida de funcionalidad de los tejidos provocada por un deterioro de las funciones de las células madre que los abastecen y regeneran. El uso de fármacos capaces de estimular la actividad de estas células podría frenar el proceso de envejecimiento. En otros casos, bastaría reponer la población de células dañadas para restaurar la función tisular, objetivo que persigue la terapia celular. Una última opción consistiría en crear órganos complejos en el laboratorio, estrategia que comienza a ser hoy en día una realidad.

En tiempo reciente, y de manera proporcional a las expectativas puestas en las terapias regenerativas, ha proliferado la oferta de tratamientos no aprobados basados en el uso de células madre. Estos no solo generan falsas esperanzas en los pacientes, sino que los someten a riesgos no controlados. Sin duda, conocer el panorama actual en este campo nos puede ayudar a comprender los beneficios y ries-



LUISMMOLINA/ISTOCKPHOTO

gos potenciales que la medicina regenerativa nos depara.

RENOVAR LAS CÉLULAS MADRE ADULTAS

Los tejidos y los órganos poseen cierta capacidad natural de regeneración, propiedad que se debe sobre todo a la presencia en ellos de células madre adultas. Estas presentan una extraordinaria aptitud para multiplicarse (proliferar) y dar lugar a tipos celulares más especializados (diferenciarse). Los procesos de proliferación y diferenciación aseguran a la vez el mantenimiento de la población original de células madre y la producción de nuevas células especializadas. De esta manera contribuyen a renovar el contenido celular de los órganos y, en ciertos casos, como en la piel, a reparar lesiones. Los tipos de células madre adultas más estudiadas son las que forman parte de la piel, la sangre y el músculo.

En algunos casos, las células madre adultas no proliferan, sino que se hallan en estado latente y solo son activadas por señales relacionadas con el estrés o traumatismos. Se sospecha que numerosos órganos presentan células madre que contribuyen a mantener un equilibrio celular constante. Por desgracia, esas células a menudo resultan difíciles de identificar, ya que son escasas y, muchas veces, morfológicamente indistinguibles de las células diferenciadas.

Aunque los mamíferos poseemos células madre, no tenemos la capacidad de regenerar extremidades u órganos complejos. Algunos animales, como los anfibios y el pez cebra, regeneran partes de su cuerpo tales como extremidades, aletas o el corazón. Durante muchos años se planteó el debate sobre si tal propiedad se debía a la existencia de células madre especiales en esos organismos. Sin embargo,



Maria José Barrero es investigadora Ramón y Cajal en el Centro de Medicina Regenerativa de Barcelona y realizó estudios posdoctorales en la Universidad Rockefeller de Nueva York.



Juan Carlos Izpisúa Belmonte dirige el Centro de Medicina Regenerativa de Barcelona y ostenta la cátedra Nobel Roger Guillemin en el Laboratorio de Expresión Génica del Instituto Salk en California.

EN SÍNTESIS

La medicina regenerativa estudia diversas estrategias para reemplazar funciones biológicas dañadas en el organismo. Una de ellas propone la administración de fármacos para rejuvenecer las poblaciones de células madre adultas y frenar así el envejecimiento de los tejidos.

La terapia celular constituye otra opción. Se basa en sustituir las células perdidas por otras que se obtienen del propio paciente y se reprograman o transdiferencian en el laboratorio para su posterior trasplante. También se examina la posibilidad de producir órganos enteros en el laboratorio, a partir de biosoportes tridimensionales repoblados con distintos tipos celulares.

En la actualidad, la mayoría de las terapias celulares se realizan con células madre de la sangre. El resto de los tratamientos con células madre se hallan en fase de ensayo clínico.

los datos recientes sugieren que esos animales utilizan una estrategia de regeneración singular. El pez cebra puede renovar una tercera parte del corazón tras una amputación. Los cardiomiocitos, las células especializadas del órgano, reaccionan ante la lesión perdiendo temporalmente sus funciones contráctiles, mediante un proceso denominado desdiferenciación, tras lo cual aceleran la división con el fin de generar un número suficiente de células que reparen el tejido. En las fases finales de la regeneración, los cardiomiocitos vuelven a recuperar progresivamente su función contráctil, al mismo tiempo que su capacidad proliferativa disminuye. [*Véase* «El pez cebra, versatilidad al servicio de la medicina», por A. Rojas Muñoz, A. Bernad y J. C. Izpisúa; Investigación y Ciencia, marzo de 2007.]

Aunque no se conocen en profundidad las bases moleculares que gobiernan el equilibrio entre los procesos de división y diferenciación, resulta evidente que las células más especializadas poseen un escaso potencial proliferativo. Quizá los organismos más complejos, como los mamíferos, hayan sacrificado esta modalidad de regeneración en favor de tipos celulares muy especializados que no pueden convertirse de nuevo en tipos indiferenciados y proliferativos.

Si bien las estrategias para estimular la regeneración de órganos y extremidades enteras en humanos de momento no parecen factibles, los esfuerzos enfocados a promover el funcionamiento de células madre adultas y evitar así el desgaste de los tejidos comienzan a ser viables. Muchos aspectos de la degeneración de los tejidos causados por el envejecimiento están asociados a alteraciones en el funcionamiento de las células madre adultas. Con la edad aumenta el número de células madre hematopoyéticas (células alojadas en la médula ósea que originan todos los tipos celulares de la sangre), pero estas pierden notablemente la capacidad de diferenciarse. Por el contrario, en el músculo y en el cerebro se observa un descenso en el número de células madre al avanzar la edad. Numerosos factores podrían intervenir en el envejecimiento de las células madre adultas. Uno de ellos corresponde al acortamiento de los telómeros (las regiones repetidas de ADN que se sitúan en los extremos de los cromosomas), el cual reduce el número de divisiones que una célula puede realizar. Otro, a la actividad metabólica habitual, que expone las células a sustancias bioquímicas hiperreactivas que causan daño en el material genético con el paso del tiempo. Por último, los cambios en la expresión de genes pro– y antiproliferativos podrían limitar la capacidad de división de estas células. Tales modificaciones no suceden únicamente a nivel genético en forma de mutaciones, sino que a menudo se producen también a nivel epigenético, es decir, en las marcas químicas presentes en el ADN o en proteínas asociadas a este. Pero esas marcas, que pueden heredarse como las mutaciones, a diferencia de ellas resultan reversibles, lo que apunta a la posibilidad de dar marcha atrás al envejecimiento de las células madre adultas. Un ejemplo de ello lo constituye la rapamicina en ratones, que corrige el envejecimiento de las células madre hematopoyéticas. [*Véase* «Un nuevo camino hacia la longevidad», por David Stipp; Investigación y Ciencia, marzo de 2012.]

TERAPIA CELULAR

Con frecuencia, la estrategia más adecuada para reparar los daños en los tejidos consiste en restituir directamente las células perdidas, un procedimiento conocido como terapia celular. Esta práctica se llevó a cabo con éxito en 1956 con el primer trasplante de médula ósea y constituye la única terapia con células madre de uso habitual hoy en día. Otros tipos de células madre adultas son objeto de intenso estudio y se están utilizando en numerosos ensayos clínicos. Entre ellas destacan las células madre mesenquimales (un tipo de células a partir de las cuales pueden originarse los diferentes tipos de tejidos conjuntivos), que se pueden obtener de tejidos de fácil acceso, como la grasa, y que pueden dar lugar a células de hueso, cartílago y tendón.

Una de las dificultades de la terapia celular consiste en disponer de una fuente y un número suficiente de células para el trasplante, además de lograr una eficiencia aceptable en la supervivencia del implante. Para resolver ese problema, las células madre adultas se aíslan y cultivan en el laboratorio para multiplicar su número antes de ser trasplantadas. Sin embargo, en muchas ocasiones, el cultivo in vitro de las células afecta su capacidad de división y de diferenciación a largo plazo. Esas alteraciones se deben en parte a las limitaciones que existen para reproducir en el laboratorio el nicho natural del organismo, donde se cuenta con factores de crecimiento, una matriz extracelular, el contacto con otros tipos celulares y una estructura tridimensional en la que ubicarse dentro del órgano. Por otra

IDEAS BÁSICAS

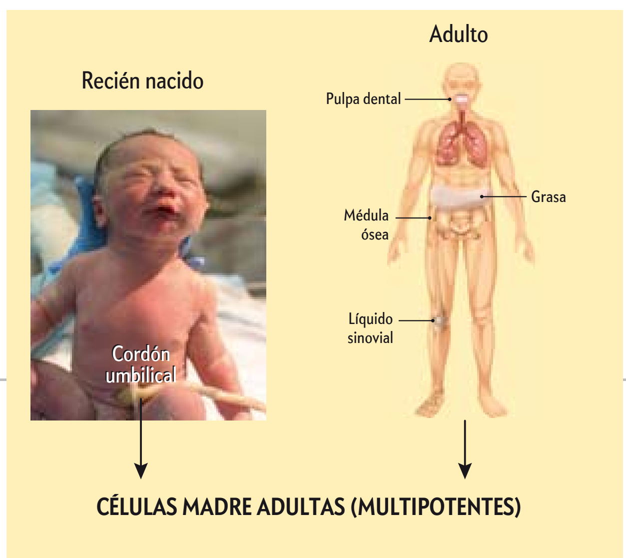
Tipos de células madre

Una célula madre es una célula indiferenciada con capacidad de dividirse y producir linajes celulares especializados. Una característica fundamental de las células madre es que pueden mantenerse (en el cuerpo o en una placa de cultivo) de forma indefinida, por lo que constituyen una fuente inagotable de vida.

Dependiendo de su origen y su grado de especialización se distinguen dos tipos principales de células madre: las embrionarias y las adultas. Las primeras son pluripotentes, es decir, presentan la capacidad de generar todos los tejidos del organismo; las segundas son multipotentes, proceden de un tejido diferenciado que puede dar lugar a unos pocos tipos de células especializadas.

Es posible aislar células pluripotentes a partir de la masa celular interna del embrión en etapa de blastocisto y, más tarde, a partir de las gónadas en desarrollo (células germinales) (*izquierda*). Tras el nacimiento se pueden aislar células multipotentes del cordón umbilical o de ciertos tejidos del organismo adulto (*derecha*).





parte, la adaptación al cultivo genera un estrés que aumenta el riesgo de mutaciones y otras aberraciones genéticas. La ingeniería de tejidos y otras disciplinas relacionadas trabajan para superar estas dificultades y obtener cultivos in vitro más eficientes y seguros.

La terapia celular presenta los mismos riesgos de rechazo que los trasplantes habituales, por lo que resulta necesario el uso de inmunodepresores y cierta compatibilidad entre donante y receptor. Algunos tipos de células, como las células madre hematopoyéticas del cordón umbilical, inducen una menor respuesta inmunitaria que otros tipos celulares o poseen la capacidad de modificarla, como las células madre mesenquimales. Por otra parte, numerosos ensayos clínicos proponen el empleo de terapias autólogas, en las que las células se obtienen de un tejido y se inyectan en otro tejido del mismo paciente.

UN PASO ADELANTE

Durante los años ochenta del siglo XX se llevó a cabo un logro importante que ofrece una posible solución a la limitada fuente de células para terapia: la derivación y cultivo de células madre embrionarias de ratón. Realizar este procedimiento en humanos llevó casi dos décadas más, en parte debido a la escasa disponibilidad de embriones y a las condiciones de cultivo más complejas respecto a las células del ratón.

Las células madre embrionarias humanas se obtienen de embriones sobrantes donados por parejas que se han sometido a programas de fecundación in vitro. Se aíslan de la masa celular interna del embrión en estado de blastocisto, entre cinco y siete días tras la fecundación. Las células madre embrionarias humanas presentan dos propiedades excepcionales. Una es su gran capacidad de proliferación en cultivo. Mientras que las células madre adultas solo se dividen un número determinado de veces, las embrionarias lo hacen de forma ilimitada, es decir, son virtualmente inmortales. Además, son pluripotentes, pueden originar cualquier célula del organismo adulto. En contraste, la células madre adultas generan un número limitado de tipos celulares; son multipotentes.

Sin embargo, la pluripotencia, que hace tan valiosas las células madre embrionarias, las hace difíciles de controlar en el laboratorio. La forma en que deben cultivarse para obtener tipos de células útiles en medicina regenerativa, como neuronas o cardiomiocitos, es objeto de intenso estudio. Por otro lado, se desconoce el grado de diferenciación apropiado para el trasplante que facilitaría la integración y supervivencia en el tejido receptor. Las células menos diferenciadas podrían poseer una mayor plasticidad, lo que les permitiría integrarse más fácilmente en el organismo. Pero al conservar las propiedades proliferativas típicas de las células indiferenciadas, podrían causar tumores.

Averiguar la manera de introducir las células en los tejidos mediante un procedimiento que resulte exitoso y mínimamente invasivo constituye otro reto a resolver. Diferentes tipos de tejido tal vez requieran estrategias distintas. La sangre constituye uno de los tejidos más prome-

CENTRO DE MEDICINA REGENERATIVA DE BARCELONA (CMRB) (*blastocisto*); WIKIMEDIA COMMONS/LUNAR CAUSTIC/CC BY-SA 2.0 (*embrión*); MARCOS PATERNOSTER/ISTOCKPHOTO (*recién nacido*); ALEXANDRA HARWOOD/ISTOCKPHOTO (*cuerpo humano*)

tedores, ya que las células podrían inyectarse en la médula ósea o directamente en la sangre del receptor, de manera similar al trasplante de médula ósea. Por desgracia, hasta el momento ningún laboratorio ha conseguido generar precursores hematopoyéticos, a partir de células madre embrionarias humanas, que puedan repoblar la médula ósea y restaurar las funciones hematopoyéticas.

REPROGRAMACIÓN Y TRANSDIFERENCIACIÓN

El uso de células madre embrionarias solventa el problema de la escasa disponibilidad de células para terapia, pero no el del rechazo. En 2006, Shinya Yamanaka, de la Universidad de Kioto, recién galardonado con el premio Nobel de fisiología o medicina, consolidó más de veinte años de investigación con células madre embrionarias al descubrir una estrategia revolucionaria, la reprogramación. Su singular hallazgo consistió en demostrar que podían generarse células madre embrionarias a partir de células de la piel de un ratón. Aunque durante los años ochenta y noventa se habían descrito las primeras manipulaciones que permitían el cambio de identidad de células de la piel a células musculares o adiposas, el descubrimiento fue recibido con escepticismo hasta que el procedimiento se reprodujo en otros laboratorios, incluso con el empleo de células humanas [*véase* «El poder terapéutico de nuestras células», por Konrad Hochedlinger; Investigación y Ciencia, julio de 2010].

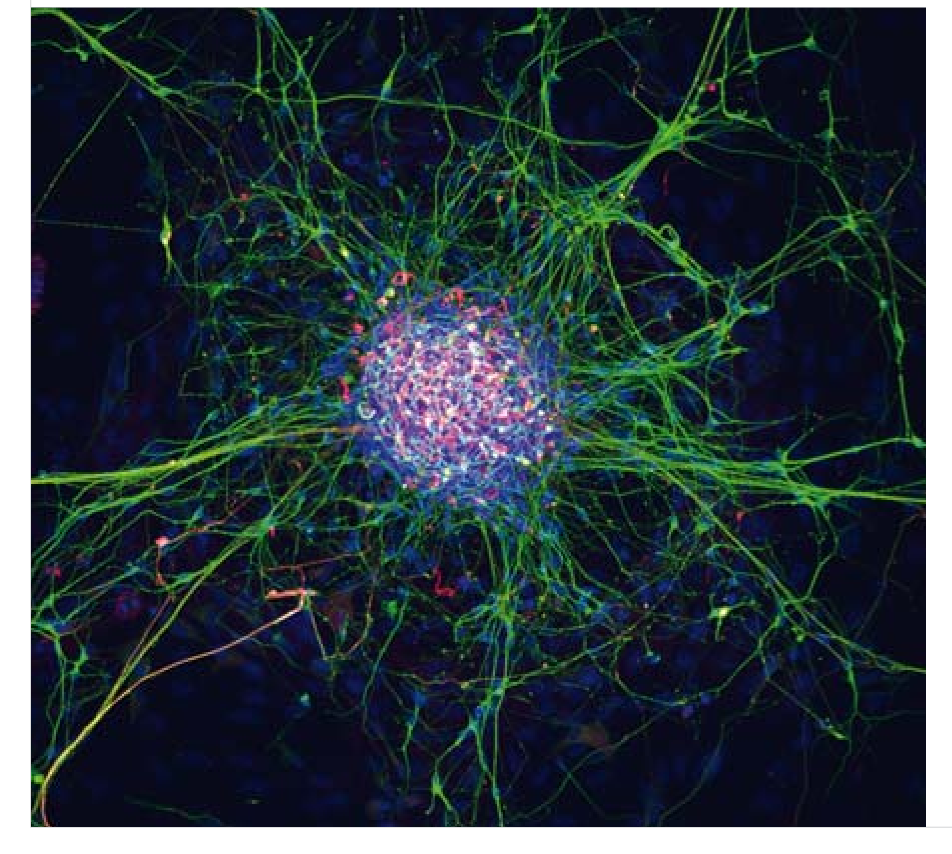
La reprogramación se inicia al introducir cuatro factores de transcripción (proteínas que intervienen en la transcripción del ADN en ARN), Oct4, Sox2, Klf4 y c-Myc, en una célula de la piel cultivada en el laboratorio. Estos factores, presentes en células embrionarias de forma natural, acaban transformando las células de la piel en células madre embrionarias en pocas semanas. Las células resultantes son casi idénticas a las aisladas a partir de embriones y se denominan células madre pluripotentes inducidas (CMPI). La técnica no solo prescinde del uso de embriones humanos, sino que además permite generar células pluripotentes totalmente compatibles con el paciente, lo que reduce el riesgo de rechazo. Una ventaja adicional del procedimiento radica en la posibilidad de curar las enfermedades genéticas: mediante terapia génica se reparan in vitro las mutaciones o se suministran copias corregidas del gen mutado, con lo que se generan células sanas para el trasplante.

No todo son ventajas, sin embargo. Las primeras mejoras en el método de reprogramación consistieron en suprimir el uso de virus para introducir los factores de transcripción en las células, ya que estos se integran en el genoma y modifican el material genético. A pesar de este avance para garantizar la seguridad terapéutica, las CMPI presentan otros problemas que ralentizan su aplicación en la práctica clínica. Se ha descrito que podrían tener cierta memoria epigenética de la célula a partir de la cual se obtuvieron y ser menos eficaces en la producción de células diferenciadas distintas a la de origen. Además, la reprogramación crea estrés celular que puede llevar a la acumulación de mutaciones en el genoma —aunque las células madre obtenidas a partir de embriones también tienden a acumular mutaciones como resultado de su cultivo in vitro.

Hoy en día se desconoce en gran medida la naturaleza molecular de los cambios que se producen durante la reprogramación, el cultivo prolongado y la diferenciación. Es, por tanto, difícil predecir las consecuencias de esas manipulaciones en la seguridad de las terapias y también se ignora si las CMPI resultan menos seguras que las embrionarias. Ese conocimiento será esencial para valorar los riesgos de la terapia con células pluripotentes.

Una alternativa a la generación de células diferenciadas de utilidad clínica sin pasar por la pluripotencia consiste en la transdiferenciación, es decir, convertir directamente un tipo celular especializado en otro. De manera similar a la reprogramación, la transdiferenciación se consigue mediante la introducción de combinaciones específicas de factores de transcripción en las células. Con esta técnica es posible generar, a partir de células de la piel, neuronas maduras, células madre adultas neuronales o cardiomiocitos.

Otro de los retos de la medicina regenerativa corresponde, pues, a la transdiferenciación de tipos celulares abundantes en los órganos hacia otros tipos celulares especializados, más escasos, que se han perdido debido a una lesión. La idea consiste en realizar todo el proceso en el cuerpo del paciente, con lo que se evita la fase de cultivo celular in vitro. La estrategia se ha llevado a cabo con éxito varias veces en ratones. En un primer estudio, realizado por Douglas A. Melton, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores, se introdujeron tres factores de transcripción mediante la inyección de virus en el páncreas, lo que provocó la transdiferenciación de las células exocrinas en

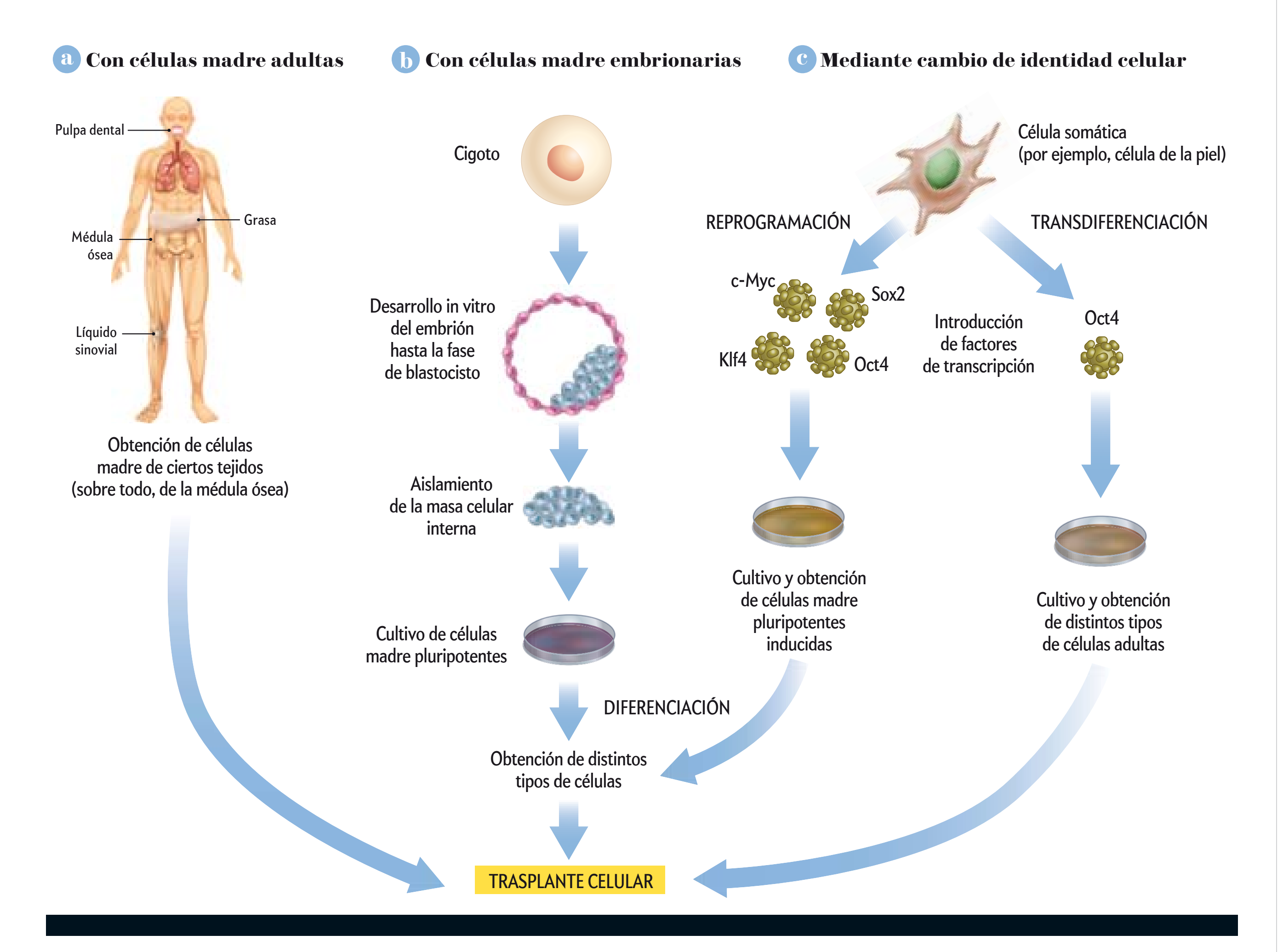


Neuronas obtenidas a partir de células madre embrionarias humanas.

CENTRO DE MEDICINA REGENERATIVA DE BARCELONA

Restituir las células perdidas

En muchos casos la mejor estrategia para reparar los daños en los tejidos es reponer directamente las células perdidas. Una de las opciones consiste en trasplantar células madre adultas obtenidas a partir de ciertos tejidos que dan lugar a un número limitado de tipos celulares (*a*). La terapia más habitual hoy en día es la que se realiza con células de la médula ósea. Otra estrategia contempla la obtención de células madre embrionarias a partir del cultivo de la masa celular interna del embrión en fase de blastocisto (*b*). De este se obtienen células pluripotentes que se pueden diferenciar a casi todos los tipos de tejidos. El cambio de identidad celular constituye otra solución que solventa los problemas de disponibilidad de células o rechazo que conllevan las dos estrategias anteriores (*c*). Se consigue con la reprogramación de una célula somática hacia una célula madre pluripotente inducida, dotada de la pluripotencia de las células madre embrionarias. O bien, con la transdiferenciación de una célula somática, que adquiere directamente la identidad de otras células somáticas sin pasar por el estado de célula madre. Ello se realiza mediante la introducción de ciertos factores de transcripción y condiciones de cultivo específicos.



ALEXANDRA HARWOOD/ISTOCKPHOTO (*cuerpo humano*)

células beta capaces de segregar insulina y regular los niveles de glucemia. En tiempo más reciente, un estudio liderado por Deepak Srivastava, de la Universidad de California, ha demostrado que se pueden transdiferenciar fibroblastos (células del tejido conjuntivo) presentes en el corazón hasta células cardíacas con capacidad contráctil (cardiomiocitos). Los investigadores inyectaron los virus con los factores necesarios para la transdiferenciación en las zonas periféricas a la lesión producida por un infarto y constataron posteriormente una mejora en las funciones cardíacas.

ÓRGANOS ARTIFICIALES

Una solución alternativa a la terapia celular consiste en producir órganos enteros en el laboratorio. Una de las principales dificultades para conseguirlo es disponer de una matriz o soporte tridimensional que permita reconstruir el órgano. Puede obtenerse a partir de órganos de donantes, los cuales se someten a un proceso de descelularización, en el que se eliminan las células del donante para dejar solo la matriz extracelular. Sobre esta se «siembran» las nuevas células que repueblan el órgano. La matriz no solo proporciona un soporte físico, sino que además contiene proteínas y señales biológicas que favorecen la repoblación celular. La generación de órganos artificiales mediante descelularización y posterior recelularización se ha demostrado en ór-

ganos de animales, tales como el corazón, el hígado y el pulmón.

Siguiendo esa estrategia, el Hospital Clínico de Barcelona marcó un hito en la historia de la medicina en 2008 al realizar un trasplante de tráquea. La tráquea de un donante fue descelularizada y recelularizada con células epiteliales y células madre mesenquimales obtenidas de la médula ósea del paciente receptor. Ello evitó los problemas de rechazo del trasplante, que pudo efectuarse sin necesidad de administrar inmunodepresores.

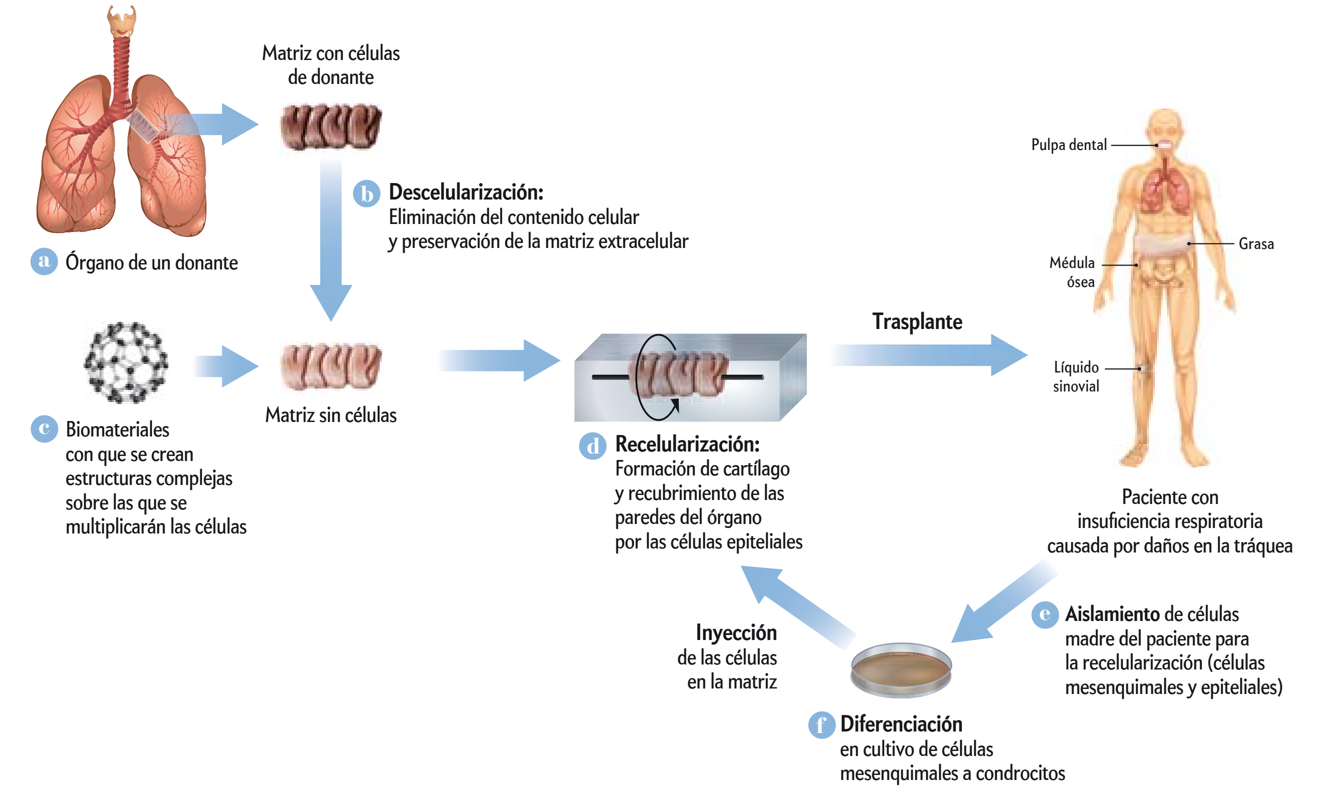
A pesar de las ventajas de la técnica, esta requiere la existencia de donantes para obtener la estructura de soporte del nuevo órgano. Una solución a ese obstáculo consiste en generar las matrices tridimensionales a partir de órganos de animales o, mejor aún, a partir de biomateriales que imiten la estructura química y física del tejido natural. En este sentido, cobran especial relevancia las disciplinas científicas como la ingeniería de tejidos, la ciencia de los materiales y la nanotecnología. Se está trabajando para producir matrices y biomateriales inteligentes que actúen a modo de soporte extracelular, pero que, además, respondan a las señales celulares e imiten características de las proteínas presentes en el tejido original [*véase* «Regeneración ósea», por Maria Pau Ginebra Molins; Investigación y Ciencia, julio de 2011]. Algunos de estos materiales ya se aplican en la práctica clínica de forma bastante exitosa. El Dermagraft, por ejemplo, es un tipo de implante de piel generado tras cultivar fibroblastos del paciente en biomateriales sintéticos en forma de red densa, que se emplea en casos de quemaduras extensas. También se hallan en fase de prueba válvulas cardíacas y arterias artificiales. Y hace poco, en el Hospital Universitario Karolinska, en Estocolmo, se ha trasplantado con éxito una tráquea mediante un procedimiento similar al llevado a cabo en el Hospital Clínico de Barcelona, pero utilizando un nanocompuesto a modo de matriz.

A pesar de los resultados prometedores, generar un órgano in vitro no es sencillo. Los órganos revisten una enorme complejidad en cuanto a los tipos de células y estructuras que los componen, sin olvidar la vasculatura, el tejido de soporte o las poblaciones de células madre adultas que contribuyen a mantenerlos. Una alternativa a su fabricación in vitro consistiría en producir órganos humanos dentro de un organismo animal. La prueba de concepto ha sido demostrada hace poco por Hiromitsu Nakauchi, de la Universidad de Tokio, en un estudio con ratones mutados que no podían desarrollar su propio páncreas y en los que se logró que formaran un páncreas funcional de rata. Para ello se inyectaron células madre embrionarias o CMPI de rata en blas-

INGENIERÍA DE TEJIDOS

Creación de órganos artificiales

Una alternativa a las terapias celulares es el trasplante de órganos obtenidos en el laboratorio a partir de un soporte o matriz tridimensional. Esta puede proceder de un donante (*a*), en cuyo caso se somete a una descelularización previa (*b*), o bien fabricarse a partir de biomateriales (*c*). La recelularización de la matriz (*d*) se realiza con células madre mesenquimales y células epiteliales del propio paciente (*e*). Las primeras se aíslan de la médula ósea y se hacen diferenciar hacia condrocitos (precursores de cartílago) en el laboratorio (*f*). El órgano artificial se trasplanta por último al paciente.



ALEXANDRA HARWOOD/ISTOCKPHOTO (*cuerpo humano y pulmones*)

tocistos de ratón, células que contribuyeron a desarrollar el páncreas necesario para la supervivencia del múrido. Sin embargo, la técnica todavía no es totalmente limpia, ya que en el órgano producido se detectó una pequeña cantidad de células de ratón, y también se identificaron células de rata en los tejidos del receptor. El trabajo alienta la posibilidad de crear órganos humanos en animales como el cerdo o la oveja, pero abre el debate ético respecto al grado de humanización que podrían adquirir estos animales y los posibles problemas de zoonosis (la transferencia de enfermedades entre especies) que se generarían.

DEL LABORATORIO A LA CLÍNICA

Introducir las palabras *stem cell therapy* en Google devuelve más de treinta y cinco millones de entradas. Muchas de las páginas web corresponden a clínicas que ofrecen tratamientos engañosos basados en el uso de células madre. En los últimos años está empezando a resultar alarmante la aparición de tratamientos no aprobados con células madre en países donde el vacío legal lo propicia. ¿Qué es verdad y qué es mentira respecto a los tratamientos con células madre?

Pese al enorme potencial que albergan, actualmente la única terapia de uso rutinario es el trasplante de células madre de la sangre (hematopoyéticas) para el tratamiento de enfermedades sanguíneas o del sistema inmunitario, o para restaurar componentes sanguíneos después del tratamiento de ciertos tipos de cáncer. Cada año se tratan con esas células, en Europa, más de 26.000 pacientes. En adultos se aíslan de la médula ósea, ya que representa el único tejido que proporciona el alto número de células necesarias para que el trasplante tenga éxito. Los niños suelen precisar un menor número de ellas, por lo que pueden obtenerse de la sangre del cordón umbilical. Las células de este tejido presentan la ventaja de ser menos inmunógenas y, por tanto, los requerimientos de compatibilidad donante-receptor resultan menos estrictos. La existencia de bancos mundiales de sangre de cordón favorecen el encuentro de un donante compatible. Sin embargo, a pesar de que los estudios iniciales sugerían que las células hematopoyéticas del cordón podrían dar lugar a numerosos tipos celulares y ser usadas para reparar múltiples tejidos, hasta la fecha solo han demostrado utilidad en la restauración del sistema sanguíneo infantil.

Si bien las células madre adultas no se emplean de manera regular en la práctica clínica salvo en los casos mencionados arriba, existen más de 600 ensayos clínicos en marcha para el tratamiento de numerosas enfermedades tales como leucemias, infartos de miocardio y cerebral, esclerosis múltiple o artritis. La fuente más habitual de células madre adultas en estos ensayos son las células madre mesenquimales, que se pueden aislar de la grasa, la médula ósea o el tejido conjuntivo.

En cuanto a los tratamientos con células madre embrionarias, el riesgo de aparición de tumores derivados del carácter pluripotente y la capacidad de proliferación ilimitada de las mismas, ha hecho que su aplicación clínica avanzara con cautela. En la actualidad solo existen tres ensayos con estas células. Su principal objetivo consiste en verificar la seguridad, es decir, que las células implantadas no formen tumores o migren a otras zonas del organismo. Los dos últimos estudios fueron iniciados en 2011 por la compañía estadounidense Advanced Cell Technology. Se realizaron con pacientes que sufrían distrofia de Stargardt o degeneración macular, enfermedades que pueden causar ceguera. A partir de células madre embrionarias humanas se obtuvieron células pigmentadas de la retina, que fueron inyectadas en la retina de los pacientes. El tratamiento con inmunodepresores no fue necesario debido a la nula o escasa respuesta inmunitaria que presenta este tejido. A principios del presente año se hicieron públicos los primeros resultados. En ambos casos, los pacientes mejoraron la visión y no se detectó la presencia de tumores. Se aporta, así, la primera prueba de que las terapias con células madre embrionarias humanas pueden llegar a ser efectivas y seguras.

EL PORVENIR

Puede que las distintas aproximaciones que planteamos hoy en la medicina regenerativa se apliquen de manera diferente en el futuro, según la enfermedad. La presencia o no de células madre adultas en los órganos que se quieren restaurar, la invasividad de las técnicas utilizadas o el tratamiento de afecciones agudas o crónicas terminan de definir las opciones disponibles. Mientras que las CMPI podrían solucionar el problema del rechazo, el largo proceso de generación y posterior diferenciación solo las hace óptimas para patologías crónicas. Cuando una lesión precisa una intervención inmediata, resulta esencial disponer de tipos celulares ya diferenciados y caracterizados listos para trasplantar. Ciertos tipos pueden obtenerse con más eficiencia a partir de células madre adultas; otros, solo a partir de células madre embrionarias.

Catorce años después del aislamiento de la primera línea de células madre embrionarias humanas vemos los primeros resultados alentadores en ensayos clínicos. Sin duda, el siglo xxi será el de la revolución biomédica. En estos días converge el avance de múltiples disciplinas científicas, como la biomedicina, la computación, la ingeniería de tejidos y el conocimiento del genoma humano. Generar células madre o neuronas a partir de células de la piel era impensable hace una década. Ahora ya es posible, gracias a los conocimientos básicos adquiridos durante los últimos años. A modo de retribución, las células madre y los procesos de reprogramación nos ofrecen hoy modelos experimentales de incalculable valor para la ciencia básica y aplicada. Disponer en el laboratorio de tipos celulares humanos de difícil acceso, valorar la eficiencia de fármacos en modelos celulares generados a partir de CMPI obtenidas de pacientes con una determinada enfermedad [*véase* «Enfermedades en una placa de Petri», por Stephen S. Hall; Investigación y Ciencia, mayo de 2011] o estudiar las etapas tempranas del desarrollo embrionario son algunas de las posibilidades que nos ofrecen hoy las células madre y que resultarán críticas para el avance de la biomedicina en este siglo.

PARA SABER MÁS

Turning straw into gold: directing cell fate for regenerative medicine. Dena E. Cohen y Douglas A. Melton en *Nature Reviews Genetics*, vol. 12, págs. 243-252, 2011.

Aplication of whole-organ tissue engineering in hepatology. Basak E. Uygun, Martin L. Yarmush y Korkut Uygun en *Nature Reviews. Gastroenterology and Hepatology* en línea, agosto de 2012: **doi:10.1038/nrgastro.2012.140**

Información actualizada y recursos educativos sobre las células madre y su impacto en la sociedad, financiado por la Comisión Europea: **www.eurostemcell.org**

Información básica sobre células madre proporcionada por el Instituto Nacional de Salud de Estados Unidos: **stemcells.nih.gov**

CIENCIA BÁSICA

Preguntas para el próximo millón de años

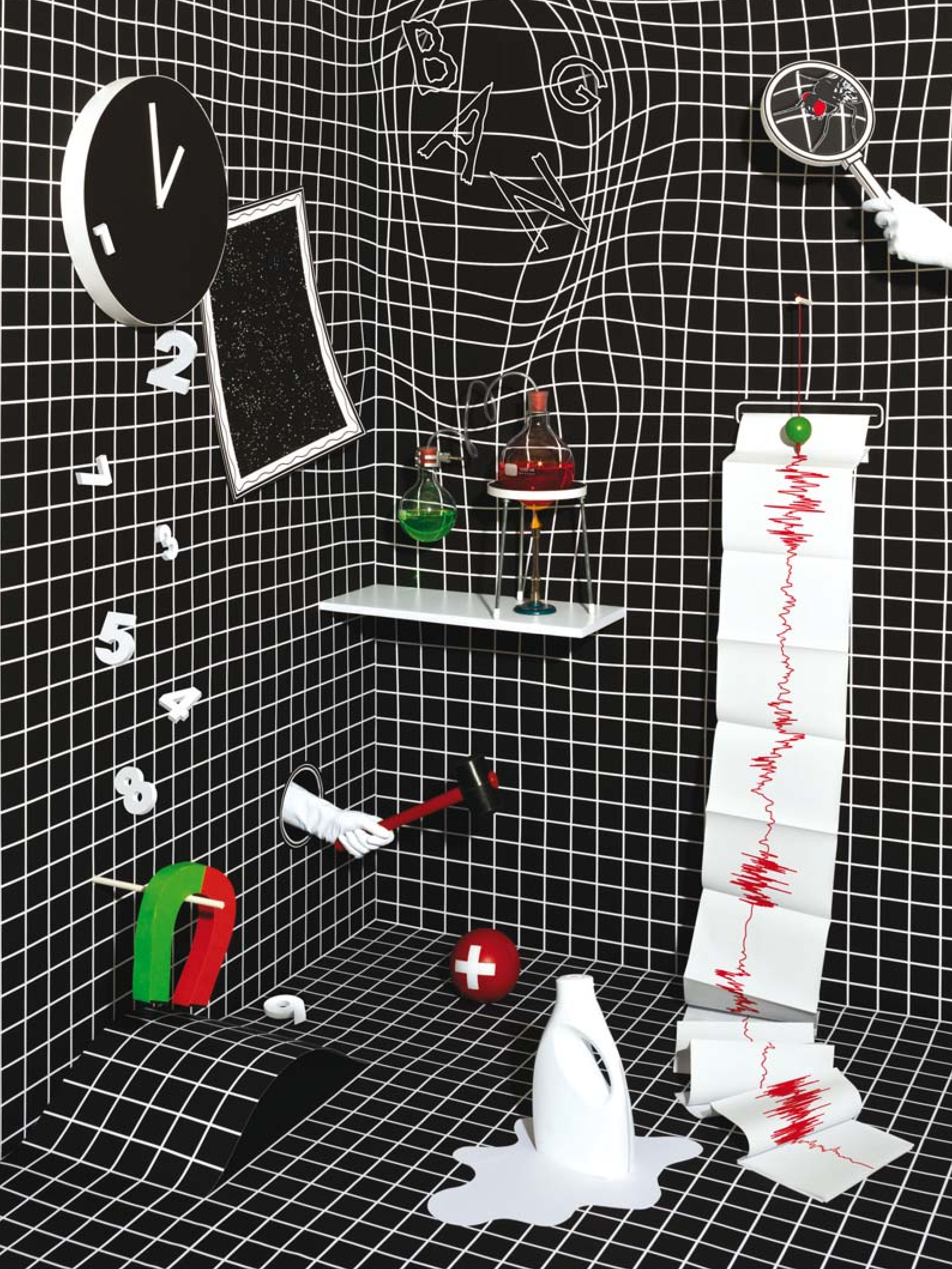
¿Qué cabría descubrir si una investigación pudiese prolongarse durante cientos, miles o millones de años?

Davide Castelvecchi

Una vida humana puede parecer eterna en relación con el picosegundo que tardan dos átomos en combinarse en una molécula, pero no es sino un pestañear de ojos si la comparamos con la formación de cadenas montañosas o con una colisión entre galaxias. Para esclarecer cuestiones cuya investigación requeriría más de una vida, cada generación de científicos ha pasado el testigo a la siguiente. En medicina, los estudios longitudinales (el seguimiento de pacientes durante largos períodos de tiempo) a menudo continúan incluso después del fallecimiento de los investigadores que los iniciaron; de hecho, algunos de los que hoy siguen en marcha comenzaron en los años veinte del siglo pasado. La toma de datos ininterrumpida más larga de la que tenemos constancia podría corresponder a los diarios astronómicos de los antiguos babilonios, cuyas observaciones comprenden al menos seis siglos del primer milenio antes de Cristo. En ellos queda patente la recurrencia de ciertos fenómenos astronómicos, como los eclipses.

En la mayoría de las disciplinas, sin embargo, algunas de las preguntas más interesantes y fundamentales continúan sin respuesta por falta de tiempo. ¿Qué ocurriría si el tiempo no supusiese ningún problema? Hemos preguntado a investigadores de distintas áreas qué cuestiones elegirían resolver si tuviesen por delante diez mil, cien mil o incluso un millón de años. A fin de que la respuesta se ciñese a los aspectos científicos y no se adentrase en el terreno de la futurología, les pedimos que sus propuestas se limitasen a aquellas que permitirían los medios técnicos actuales. A continuación incluimos una versión resumida de sus respuestas.

PIXELGARTEN


BANG

10.000 AÑOS ¿CÓMO COMENZÓ LA VIDA?

ROBERT HAZEN, experto en ciencias de la Tierra de la Universidad George Mason

A principios de los años cincuenta, Stanley Miller y Harold Urey, de la Universidad de Chicago, demostraron que algunos de los elementos básicos para la vida, como los aminoácidos, aparecían de forma espontánea si se recreaban las condiciones adecuadas. Entonces muchos pensaron que para resolver el misterio de la vida tal vez bastase con combinar las sustancias adecuadas y esperar un tiempo razonable, pero no fue así. Con una versión moderna del experimento de Urey y Miller, sin embargo, quizá diez mil años fuesen suficientes para obtener una molécula rudimentaria con la capacidad de replicarse y evolucionar por selección natural: en definitiva, lo que llamamos vida.

Semejante experimento debería tener lugar en un entorno geoquímico plausible y empezar de cero. La sopa primordial pudo albergar millones de moléculas diferentes y dar cabida a un número astronómico de reacciones químicas. En el mar, sin embargo, dichas sustancias habrían estado tan diluidas que la probabilidad de que dos moléculas coincidiesen en un mismo lugar —por no hablar de que reaccionasen— debió de ser ínfima. Parece más razonable, por tanto, suponer que las primeras moléculas con la facultad de replicarse surgiesen en superficies rocosas. Las zonas húmedas de la Tierra primigenia habrían propiciado un vasto laboratorio natural en el que, en cada momento, se estaban ejecutando unos 10^{30} pequeños experimentos, en un proceso que se prolongó entre 100 y 500 millones de años.

Diez mil años deberían bastar para que un laboratorio bien equipado acabase recreando esa situación. Vistos desde el exterior, los criaderos moleculares parecerían salas llenas de servidores informáticos. Sin embargo, su interior se encontraría repleto de «laboratorios en microchips» con cientos de orificios microscópicos, cada uno con distintas combinaciones de compuestos que reaccionarían sobre superficies minerales diversas. Los chips monitorizarían esas reacciones, a fin de detectar la aparición de un proceso de reaplicación autónoma sostenida.

La clave para acortar a miles de años la duración de un experimento que debería durar millones consistiría en centrarse en las reacciones y compuestos más prometedores. Con suerte, quizás algún día sepamos lo suficiente sobre la naturaleza como para reducirlo a unas décadas.

10.000 AÑOS ¿SON CONSTANTES LAS CONSTANTES DE LA NATURALEZA?

GERALD GABRIELSE, físico de la Universidad Harvard

Las leyes de la física parecen universales y eternas: todos los protones poseen la misma carga eléctrica y la luz siempre viaja a la misma velocidad. Sin embargo, no faltan modelos teóricos que postulan variaciones de dichas cantidades ni estudios astronómicos que afirman haber medido pequeños cambios en las constantes de la naturaleza. Por ahora, los datos obtenidos en el laboratorio continúan inmutables. En el nuestro, hemos logrado medir el momento magnético del electrón con la que, hasta donde tengo noticia, es la precisión más elevada alcanzada hasta ahora en la determinación de cualquier propiedad de una partícula elemental. Pero, si repitiésemos el experimento una y otra vez durante miles de años, tal vez observásemos cambios en dicha cantidad.

Para medir el momento magnético del electrón (el análogo subatómico a la intensidad de un imán común), confinamos un único electrón en un plano con un campo electrostático y aplicamos un campo magnético para inducir en la partícula un movimiento circular. Nuestros instrumentos trabajan a una temperatura inferior a una décima de grado sobre el cero absoluto, por lo que el movimiento del electrón se encuentra en el estado de mínima energía. Después, con ondas de radiofrecuencia, invertimos el momento magnético del electrón. La respuesta de la partícula y la frecuencia con la que podemos provocar ese giro dependen de su momento magnético, el cual hemos medido con un error de tres partes en diez billones (10^{13}).

Si el momento magnético del electrón hubiese aumentado o disminuido una milésima desde el comienzo del universo —y si dicho cambio se hubiese producido de manera uniforme— nuestro experimento tendría que haberlo detectado. Por supuesto, resulta imposible demostrar que algo permanece constante; lo único que podemos afirmar es que su tasa de variación se halla por debajo de cierta cota. Además, esos cambios podrían ser hoy muchísimo menores que en el universo primitivo. Con todo, si repitiésemos nuestro experimento durante diez mil años y no midiésemos ninguna variación, podríamos imponer límites muy estrictos a las teorías que contemplan variaciones en las constantes de la naturaleza. (Ello también pondría en aprietos a quienes aseguran que las mediciones de cuásares distantes revelan que la constante de acoplamiento electromagnética ha cambiado su valor desde los primeros momentos del universo.)

No cabe duda de que nuestras técnicas se perfeccionarán en el futuro, por lo que espero que los avances en esta dirección tarden menos de 10.000 años en llegar.

EN SÍNTESIS

En ciencia, numerosas cuestiones básicas carecen de respuesta debido a que hacen referencia a escalas de tiempo mucho mayores que una vida humana.

Si el límite de tiempo no fuese un problema, ¿cuáles de esas preguntas podrían resolverse con la tecnología actual?

Este artículo incluye la respuesta de varios investigadores. Estas abarcan desde el origen de la vida hasta la estructura a gran escala del universo.

10.000 AÑOS
¿CUÁN FRECUENTES SON LOS GRANDES TERREMOTOS?

THORNE LAY, sismólogo de la Universidad de California en Santa Cruz

El terremoto Tohoku-Oki, de magnitud 9,0, y el posterior tsunami que en marzo de 2011 devastaron la zona nororiental de Japón sorprendieron a los sismólogos: casi nadie pensaba que aquella falla pudiera liberar tanta energía en un solo episodio. El historial sísmico de una región puede reconstruirse de manera indirecta a partir de su geología, pero dicho método no podrá competir jamás con la detección directa. Los sismógrafos modernos se inventaron hace poco más de un siglo, un tiempo insuficiente para adquirir una idea clara de la dinámica de los grandes terremotos, los cuales pueden tardar hasta varios siglos en desencadenarse sobre una zona determinada. Si pudiésemos tomar medidas durante miles de años, no solo calcularíamos mejor el riesgo sísmico, sino que podríamos determinar qué regiones resultan proclives a sufrir terremotos de magnitud 9,0 aunque en ellas no se haya documentado jamás un seísmo de magnitud superior a 8,0.

Un registro de miles de años nos daría la respuesta a otro enigma: ¿tienden los grandes terremotos mundiales (de magnitud igual a 8,5 o mayor) a agruparse en el tiempo? Los registros históricos de los últimos cien años sugieren que podría ser así: en la última década hubo seis, pero en las tres anteriores no se produjo ninguno. Una mayor cantidad de datos nos revelaría si dicha concentración de seísmos fue producto de alguna dinámica geológica o una mera fluctuación estadística.



¿Evolucionaremos para resistir las enfermedades?

«La dieta humana sigue cambiando y provocando nuevos problemas, como la diabetes. Al cabo de miles de años, ¿se habrán adaptado nuestros cuerpos?»

- **Sarah Tishkoff,** especialista en genética humana en la Universidad de Pensilvania

10.000 AÑOS
¿CÓMO EXPLOTAN LAS ESTRELLAS MASIVAS?

COLE MILLER, astrónomo de la Universidad de Maryland

Las supernovas son sucesos muy poco frecuentes: en una galaxia espiral de gran tamaño, como la nuestra, tan solo explota una cada varias décadas. La última vez que una supernova en la Vía Láctea pudo verse desde la Tierra fue en 1604. Johannes Kepler la describió como un objeto más brillante que cualquier otro del cielo nocturno, salvo Venus. Todas las que hemos visto después de esa fecha han explotado en otras galaxias, a millones o miles de millones de años luz. El día que por fin volvamos a observar una supernova cercana, no solo la estudiaremos con telescopios ordinarios, sino con otros dos tipos de observatorios: de neutrinos y de ondas gravitacionales. Estos últimos nos dirán lo que realmente ocurre en el interior de la estrella. Si se nos permitiese esperar 10.000 años, casi con total seguridad presenciaríamos unos cien o doscientos sucesos de ese tipo; bastantes como para distinguir sus sutiles diferencias.

Una supernova podría estallar en nuestra galaxia en cualquier momento. Cuando comenzase, los ordenadores de los observatorios de ondas gravitacionales anunciarían la detección de ligeras perturbaciones en el tejido del espaciotiempo. Las ondas gravitacionales constituyen una predicción clave de la teoría de la relatividad general de Einstein; sin embargo, hasta ahora no han sido detectadas de forma directa. Esas ondas indicarán que el núcleo de la estrella ha comenzado a colapsar bajo su propio peso. Una vez comprimida, la materia se convierte en neutrones y libera ingentes cantidades de neutrinos, partículas que atraviesan la materia con facilidad y que, por tanto, pueden escapar a través de las capas exteriores de la estrella y llegar hasta los observatorios terrestres. La energía liberada en el proceso, transportada en su mayor parte por neutrinos, puede reventar las capas exteriores de la estrella y provocar un brillo sobrecogedor. En ocasiones, sin embargo, la onda de choque puede esfumarse, en cuyo caso se emitirían ondas gravitacionales pero no una gran cantidad de luz. No lo sabemos a ciencia cierta, pues hasta ahora solo hemos observado las fases finales y visibles del proceso (con la sola excepción de los neutrinos procedentes de una supernova detectada en 1987). Disponer de miles de años para realizar observaciones supondría una diferencia clave. Y las nuevas herramientas nos permitirían abordar otra cuestión aún no resuelta: en qué condiciones una estrella moribunda deja tras de sí una estrella de neutrones, y en cuáles acaba convertida en un agujero negro.



¿Cuán inteligentes pueden ser?

«Si hiciéramos evolucionar una población de chimpancés u otros primates no humanos de manera que mejorasen sus facultades cognitivas, ¿hasta dónde llegarían?»

- **Bruce Lahn,** experto en genética de la Universidad de Chicago

ILUSTRACIONES DE THOMAS FUCHS

100.000 AÑOS ¿CÓMO SE DEGRADAN LOS MATERIALES?

KRISTIN PERSSON, física teórica y de materiales del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley

Construimos sin cesar, pero ¿cómo saber cuánto durarán nuestras obras? Si nos proponemos levantar cementerios nucleares, deberemos cerciorarnos de que aguantarán hasta que los residuos dejen de suponer algún peligro. Y si no deseamos llenar el planeta de basura, convendría conocer cuánto tiempo tardan en degradarse los plásticos y otros materiales. El único método para estar seguros consiste en someter dichos materiales a pruebas de esfuerzo durante unos 100.000 años y observar los resultados. De este modo, aprenderíamos a fabricar objetos que en verdad duran, o que se descomponen de forma ecológica.

Podríamos realizar pruebas con materiales como vidrios y aleaciones de cobre, utilizados para almacenar residuos nucleares. (Aunque los depósitos se entierran a grandes profundidades y en lugares cuidadosamente escogidos, las condiciones geológicas pueden cambiar de forma impredecible en pocos miles de años.) En tales experimentos, los materiales se someterían a un desgaste mecánico acelerado, a estrés químico (por ejemplo, con variaciones de *p*H) y a acusadas variaciones de temperatura para simular los ciclos diarios y estacionales.

Incluso los materiales que parecen resistir en condiciones extremas durante años podrían estar degradándose poco a poco. Los métodos actuales no permiten comprobar si se ha producido una erosión de unos pocos átomos. A lo largo de muchos miles de años, sin embargo, los daños comenzarían a notarse. Ello nos mostraría qué materiales son los mejores.

Las pruebas a largo plazo resultarían de enorme utilidad para otras aplicaciones. Las técnicas de laboratorio actuales no pueden predecir cómo se comportará la batería de un vehículo eléctrico dentro de quince años. Con el tiempo, tal vez las simulaciones informáticas alcancen el grado de complejidad requerido para sustituir a los experimentos a largo plazo. Mientras tanto, deberemos examinar con lupa la calidad de los objetos que deban durar largo tiempo.



¿Volverán las guerras locales?

«Si para cuando se agoten los combustibles fósiles no contamos con un reemplazo, nuestras sociedades retornarán del ámbito global al local. ¿Volveremos a caer en el tribalismo y en las interminables guerras locales?»

- **Laurence Smith,** geógrafo de la Universidad de California en Los Ángeles

100.000 AÑOS ¿CÓMO SURGE UNA NUEVA ESPECIE?

JERRY COYNE, biólogo evolutivo de la Universidad de Chicago

La mayoría de las especies surgen cuando una población queda geográficamente aislada de otras. Entonces se adapta al entorno local y, antes o después, adquiere rasgos que le impiden aparearse con éxito con la especie original, que tornan estéril a la progenie resultante, o ambas. La gran cuestión aún no resuelta de la biología evolutiva es cuál de esas dos barreras reproductivas aparece primero: ¿la que dificulta los cruces o la que da lugar a crías inviables?

La especiación requiere escalas de tiempo geológicas. Por tanto, aunque dispongamos de pruebas en el registro fósil o en el ADN, para observarla directamente habríamos de esperar un millón de años o más. (Se han documentado vías de especiación mucho más rápidas en ausencia de separación geográfica, pero tales casos constituyen más la excepción que la norma). Sin embargo, con 100.000 años por delante deberíamos ser capaces de reproducir el proceso en el laboratorio.

La clave residiría en trabajar con un organismo de reproducción muy rápida, como *Drosophila* (la mosca de la fruta). Se aislarían en el laboratorio dos o más poblaciones, las cuales serían sometidas a dietas y condiciones ambientales diferentes. Cada cierto tiempo se examinaría cada una a fin de detectar mutaciones y cambios en su anatomía, fisiología y comportamiento. Y, de tanto en tanto, se cruzarían los miembros de poblaciones distintas.

Junto con mis colaboradores, en ciertos casos hemos llegado a entender las barreras reproductivas a partir de métodos indirectos, al estudiar especies muy próximas en distintas etapas de la divergencia evolutiva. En el caso de especies de *Drosophila* separadas geográficamente, hallamos que ambas barreras (problemas en el apareamiento y descendencia estéril) surgían a una velocidad similar. Sin embargo, cuando las especies habitaban en una misma zona, parecían asomar primero las dificultades en el cruce. Ignoramos si estos resultados reflejan de manera fiel lo que ocurre en otros organismos.

Para obtener con rapidez una nueva especie —en quizá solo cien años— podríamos aumentar la presión de selección en el laboratorio. En un famoso experimento realizado en la década de los ochenta, se criaron varias poblaciones de moscas de la fruta que acabaron adaptándose a distintos entornos —y prefiriendo aparearse con individuos que compartían sus preferencias de hábitat— en solo veinticinco generaciones. Sin embargo, las condiciones de dicho experimento eran artificiales y, además, no queda claro que las poblaciones obtenidas pudiesen considerarse especies diferentes. En este sentido, un experimento de larga duración resultaría definitivo.

UN MILLÓN DE AÑOS ¿ES EL UNIVERSO ASIMÉTRICO?

GLENN STARKMAN, físico de la Universidad Case Western Reserve

El fragor de la gran explosión dejó tras de sí una radiación que, desde entonces, permea el universo. Las sondas espaciales han cartografiado la radiación de fondo de microondas (CMB, por sus siglas en inglés) en todo el cielo y la han hallado extraordinariamente uniforme, salvo por ínfimas fluctuaciones aleatorias predichas por la teoría de la gran explosión. Esa regularidad en el CMB implica que el universo primitivo era igual de uniforme. Sin embargo, algunos análisis, entre los que se encuentran los que hemos realizado junto con otros colaboradores, han observado un exceso de simetría entre lados opuestos del firmamento, así como otras anomalías, como la ausencia de las fluctuaciones de mayor tamaño (aquellas que deberían abarcar más de sesenta grados en el firmamento).

Para averiguar si ello esconde algún otro fenómeno o si no constituye más que una coincidencia estadística, en principio bastaría con realizar más observaciones. El CMB que vemos hoy no es más que un accidente de nuestra posición en el espacio y el tiempo. Esa radiación lleva algo menos de 13.700 millones de años (la edad del universo) viajando hacia nosotros desde todas las direcciones. Por tanto, analizarla equivale a cartografiar una superficie esférica centrada en la Tierra y con un radio de unos 13.700 millones de años luz. Si esperamos lo suficiente, esa esfera irá aumentando de tamaño. Las anomalías proceden de regiones tan extensas del espacio que el CMB podría tardar mil millones de años en rebasarlas; es decir, cuando el radio de la esfera alcance los 14.700 millones de años luz. Si pudiéramos esperar «solo» un millón de años, la mayoría de las anomalías deberían seguir ahí, pero ligeramente modificadas. Si estuviesen en proceso de desaparecer, ello supondría un indicio de que se trataba de una coincidencia. En caso de persistir, estarían revelando la existencia de estructuras cósmicas de mayor tamaño.



¿Crecerá nuestra cabeza?

«La estrechez del canal del parto limita de manera importante el tamaño que puede alcanzar nuestra cabeza. ¿Nos llevaría una práctica continuada de cesáreas durante cientos de miles de años a desarrollar cerebros mayores?»

▪ **Katerina Harvati,** paleoantropóloga de la Universidad de Tubinga

UN MILLÓN DE AÑOS ¿SON ETERNOS LOS PROTONES?

SEAN M. CARROLL, físico teórico del Instituto de Tecnología de California

La materia ordinaria del universo se compone en su mayor parte de protones; partículas que han existido desde la gran explosión. Aunque otras partículas subatómicas, como los neutrones, acaban desintegrándose de manera espontánea, el protón parece excepcionalmente estable. Sin embargo, algunas teorías de gran unificación (aquellas que intentan describir toda la física de partículas como diferentes facetas de una sola interacción fundamental) predicen que los protones deberían desintegrarse tras una vida media que, en ciertos casos, se calcula en 10^{43} años. ¿Podríamos llegar a observar algo así?

Para observar la desintegración de un protón, todo lo que tendríamos que hacer es llenar un gran depósito de agua y esperar: cuando se desintegrase el protón de alguno de los átomos en el tanque, veríamos un leve destello de luz. Cuantos más protones contenga la muestra, mayores serán las probabilidades de que ello suceda. Los estudios realizados hasta ahora han demostrado que la vida media del protón asciende, al menos, a 10^{34} años, una cota que ya ha permitido refutar varios modelos de gran unificación.

Para estar completamente seguros, los detectores actuales podrían tener que estar funcionando durante cien millones de años. No obstante, si construyésemos detectores cien veces mayores (del tamaño de un estadio de fútbol y con una capacidad para cinco millones de toneladas de agua), bastaría con aguardar un millón de años. Unificar la física de partículas bien podría valer la espera.



¿Cómo afectará a nuestra biología el aumento en la edad de parto?

«Hoy la gente tiene hijos a edades cada vez más tardías, cuando el esperma muta con mayor facilidad y cuando la manera de criar a un niño es otra. Tras decenas de miles de años, ¿acabarán esos cambios culturales afectando a nuestra biología?»

▪ **Marcus Feldman,** biólogo matemático de la Universidad Stanford

PARA SABER MÁS

Origen mineral de la vida. Robert M. Hazen en *Investigación y Ciencia*, n.º 297, págs. 48-55, junio de 2001.
Ondas en el espaciotiempo. W. Wayt Gibbs en *Investigación y Ciencia*, n.º 309, págs. 24-33, junio de 2002.
Variación de las constantes. John D. Barrow y John K. Webb en *Investigación y Ciencia*, n.º 347, págs. 14-21, agosto de 2005.
Disonancia cósmica. Glenn D. Starkman y Dominik J. Schwarz en *Investigación y Ciencia*, n.º 439, págs. 22-29, octubre de 2005.
¿Qué es una especie? Carl Zimmer en *Investigación y Ciencia*, n.º 383 págs. 66-73; agosto de 2008.

ECOLOGÍA

El gran experimento climático

¿A cuánta presión podemos someter el planeta?

Ken Caldeira

Ilustraciones de Tyler Jacobson

[redacted]



TYLER JACOBSON

Los pronósticos empresariales, gubernamentales y tecnológicos suelen abarcar entre 10 y 50 años como máximo. Entre los climatólogos, oímos hablar con frecuencia de lo que podría suceder a finales de siglo. En realidad, los efectos del dióxido de carbono que ya hemos vertido en la atmósfera se prolongarán durante cientos de miles de años.

¿Cómo afectarán los gases de efecto invernadero al futuro próximo? No lo sabemos con certeza. Sin embargo, gracias a los modelos matemáticos basados en el clima pasado y a nuestros conocimientos sobre los intrincados procesos que rigen el clima, su física y su química, sí podemos aventurar qué aspecto mostrará la Tierra.

Ya estamos presenciando cómo cobra forma el futuro vaticinado por muchos de esos modelos. Tal y como pronosticaban, el calentamiento ha afectado más a los continentes que a los océanos, ha sido mayor en los polos que en el ecuador, más acusado en invierno que en verano, y mayor durante la noche que durante el día. Las precipitaciones extremas se han sucedido más a menudo. En el Ártico, la superficie cubierta por hielo y nieve ha disminuido; el permafrost,



Futuro próximo: La civilización industrial emite cada vez más gases de efecto invernadero. A finales de siglo, estos provocarán temperaturas más cálidas, un tiempo más inestable y cambios climáticos locales.



Ken Caldeira es climatólogo. Trabaja en el departamento de ecología global de la Institución Carnegie para la Ciencia de la Universidad Stanford. Su investigación se centra en el estudio del clima, el carbono y los sistemas energéticos. Como herramientas principales, emplea modelos climáticos y del ciclo del carbono. Realiza también campañas de campo sobre la acidificación de los océanos.

EN SÍNTESIS

Nadie puede predecir con certeza cuánto CO_2 acabaremos vertiendo a la atmósfera, pero los efectos de las emisiones actuales se prolongarán durante decenas de milenios.

Si continúa la quema descontrolada de combustibles fósiles, la concentración atmosférica de CO_2 alcanzará los niveles del Cretácico, hace cien millones de años.

El clima se transformará y las especies deberán adaptarse. La cantidad de vegetación aumentará, pero la biodiversidad se resentirá y el océano anegará extensas regiones continentales.

rico en metano, está comenzando a fundirse. El tiempo meteorológico se comporta de un modo cada vez más extraño, con tormentas intensificadas por el calor adicional.

¿Cuáles serán las consecuencias últimas del cambio que estamos provocando? El mejor ejemplo histórico lo hallamos en el clima del Cretácico, hace 100 millones de años. En aquella época, un aire caliente y húmedo envolvía la piel de los dinosaurios, en los polos nadaban criaturas semejantes a los cocodrilos actuales y una exuberante flora se multiplicaba en un ambiente rico en dióxido de carbono. Las consecuencias del invernadero que estamos creando en la actualidad perdurarán decenas de milenios. Pero antes afectará profundamente a una gran parte de la vida del planeta; en particular, a los humanos.

UN DESIERTO EN EL SUR DE EUROPA

Una de las mayores incógnitas corresponde a la cantidad total de dióxido de carbono que acabaremos liberando a la atmósfera. En el presente artículo partiremos de la base de que la civilización industrial continuará obrando del mismo modo en que lo ha hecho durante los últimos 200 años: quemando combustibles fósiles a un ritmo cada vez mayor, hasta que ya no pueda extraerse más del subsuelo.

¿Cuánto CO_2 podemos introducir en la atmósfera? En una forma u otra, existen unos mil billones (10^{15}) de toneladas de carbono orgánico en las capas sedimentarias de nuestro planeta. Hasta ahora, hemos quemado solo la vigésima parte del uno por ciento de dicho carbono, lo que ha generado unos dos billones de toneladas de CO_2.

Con todo ese carbono atrapado en la corteza terrestre, los combustibles fósiles no se agotarán nunca. En la actualidad, extraemos petróleo de arenas bituminosas y gas natural de pizarras fracturadas hidráulicamente, dos recursos antaño considerados imposibles de explotar tanto técnica como económicamente. Nadie puede predecir hasta dónde llegará nuestro ingenio. Pero, antes o después, los costes de extracción y refinado aumentarán tanto que los combustibles fósiles resultarán más caros que los recursos alternativos. Aquí supondremos que acabaremos quemando el uno por ciento de todo el carbono disponible, una cifra que se encuentra dentro de los márgenes que se consideran más probables.

En caso de no modificar nuestros hábitos, hacia 2100 la Tierra podría haberse calentado unos 5 grados Celsius, una cifra que podría verse reducida a la mitad o multiplicada por dos dependiendo, sobre todo, de cómo reaccionen las nubes. En las latitudes medias del hemisferio norte (entre 30° y 60°, una franja que incluye EE.UU., Europa, China y gran parte de Canadá y Rusia), la temperatura media anual desciende unos dos tercios de grado Celsius por cada grado de latitud en dirección norte. Por tanto, un calentamiento de 5 grados equivaldría a un desplazamiento medio de 800 kilómetros hacia el polo; si ese aumento tiene lugar en un siglo, estaríamos hablando de una migración de las bandas de temperatura en dirección norte a una velocidad de unos 20 metros *cada día*. Tal vez las ardillas logren seguir el ritmo, pero los olmos o las lombrices lo tendrán más difícil.

A dicha situación hemos de añadir el efecto de las precipitaciones. La Tierra funciona como un motor térmico de escala planetaria. Cuando el sol calienta el aire ecuatorial, este asciende y se enfría. El enfriamiento provoca la condensación del vapor de agua que hay en el aire, lo que genera lluvias. A ello se debe la existencia de un cinturón de precipitaciones torrenciales en las latitudes ecuatoriales.

Pero la condensación del agua eleva la temperatura del aire circundante, por lo que este asciende aún más rápido. Ese aire, seco y caliente, se eleva hasta alcanzar la altura a la que vuela un avión a reacción; después, se dispersa hacia los polos. A esa altura, el aire caliente radia energía hacia el espacio, de modo que comienza a enfriarse y desciende. Los rayos del sol atraviesan ese aire seco y calientan la superficie. En la actualidad, el descenso del aire seco se produce en latitudes próximas a los 30° en ambos hemisferios, lo que da lugar a los extensos cinturones desérticos que circunvalan el globo. Debido al calentamiento derivado del efecto invernadero, el aire que asciende lo hace con una temperatura mayor. Por tanto, tarda más tiempo en enfriarse y, en su camino hacia los polos, recorre una distancia mayor antes de caer de nuevo. En consecuencia, los desiertos se moverán hacia los polos.

El clima del desierto del Sáhara se desplazaría hacia el norte. El sur de Europa ya ha comenzado a experimentar sequías más duras de lo normal a pesar del aumento global de las precipitaciones, por lo que podría perder su clima mediterráneo, tan deseado en otros lugares del pla-

neta. Las generaciones venideras, en cambio, tendrán una mejor opinión del clima escandinavo. En las latitudes medias septentrionales, las temporadas de cultivo se están prolongando. La primavera se anticipa: las plantas florecen, los lagos helados se funden y las aves migratorias regresan antes de lo que solían.

Pero esa no será la única ventaja de la que se beneficiarán los cultivos de Canadá o Siberia. Las plantas sintetizan su alimento a partir de CO_2 y agua. En la mayoría de los casos, absorben CO_2 a través de los estomas, pequeños poros en la superficie de las hojas. Cuando estos se encuentran completamente abiertos, el vegetal puede absorber grandes cantidades de CO_2, pero, al mismo tiempo, pierde agua a causa de una mayor evaporación a través de tales orificios. Una concentración de CO_2 en el aire más elevada implica que la planta puede capturar más gas abriendo solo ligeramente los estomas, o incluso con una menor cantidad de ellos. Por tanto, en un planeta rico en CO_2, una planta puede crecer más con la la misma cantidad de agua. (Sin embargo, una disminución de la evaporación procedente de la vegetación conlleva un descenso de las precipitaciones; además, dado que la evaporación provoca enfriamiento, las temperaturas se incrementarían aún más.)

Tales beneficios no se percibirán en todo el planeta. En los trópicos, las altas temperaturas ya han puesto en peligro un gran número de cosechas, algo que probablemente empeorará con el calentamiento global. En conjunto, puede que se produzca un aumento neto en la productividad de los cultivos, con un incremento en el norte más acusado que las mermas de la región ecuatorial. Tal vez el calentamiento no reduzca la producción alimentaria, pero seguramente dé más a los ricos y menos a los pobres.

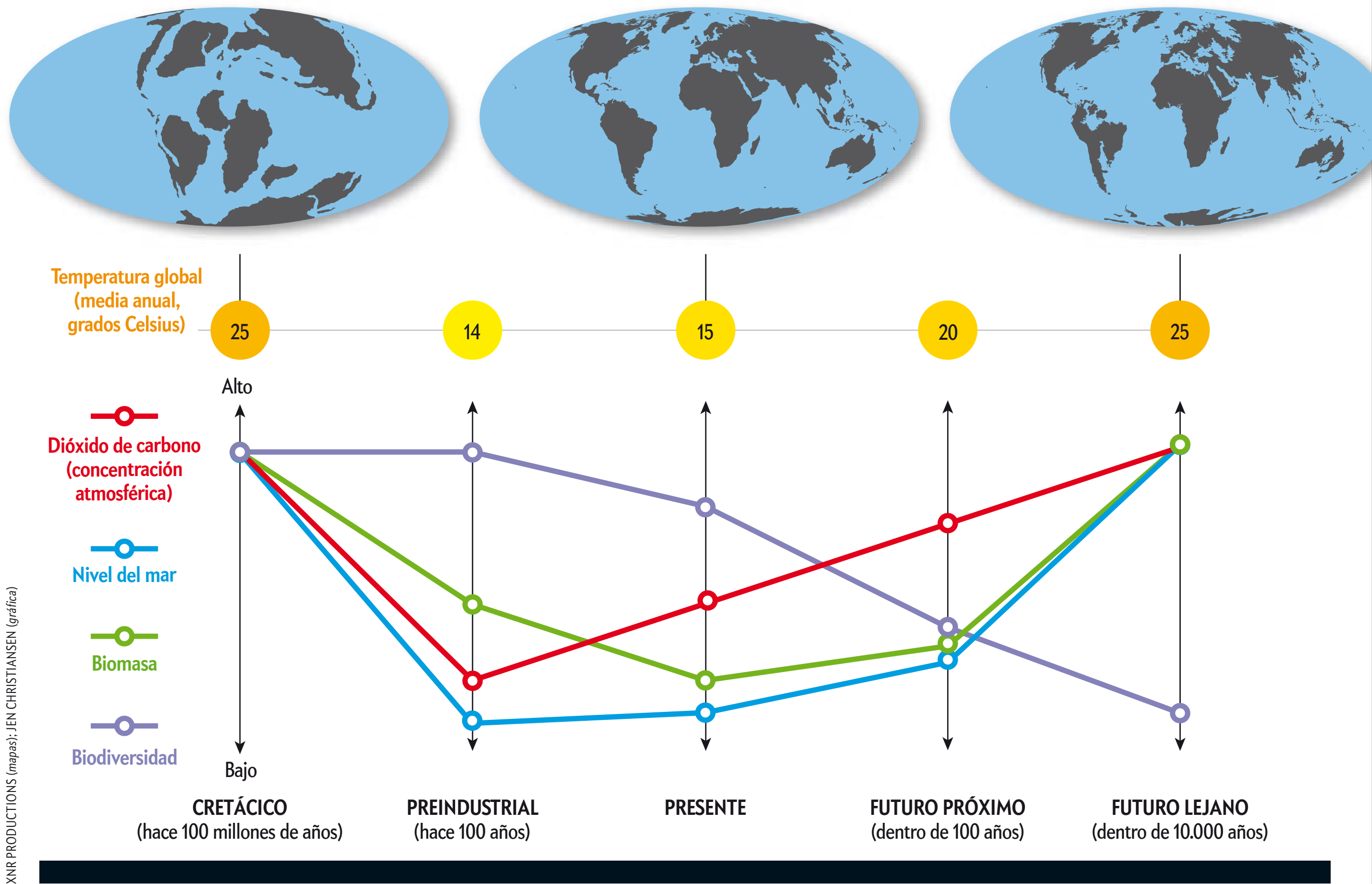
LOS OCÉANOS DEL CAMBIO

Los océanos oponen más resistencia al cambio, pero acabarán cediendo. Nunca antes —con la posible excepción de los episodios de extinción masiva— había experimentado la química del océano tantas y tan rápidas transformaciones como las

SALTO EN EL TIEMPO

Clima pasado y futuro

Si continúa la quema descontrolada de combustibles fósiles y se inyectan sin tregua gases de efecto invernadero en la atmósfera, el planeta se transformará. La temperatura global ya ha aumentado en casi un grado Celsius; en el Ártico, más del doble. La temperatura media podría llegar a aumentar diez grados; lo suficiente como para fundir el hielo de los glaciares de Groenlandia y la Antártida, lo que provocaría una subida de 120 metros del nivel del mar. Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono alcanzarán los niveles del Cretácico, cuando los dinosaurios deambulaban sobre la Tierra, América del Norte estaba dividida en dos por un enorme mar interior y criaturas similares a cocodrilos actuales habitaban los polos.





Futuro lejano: **Si las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la quema de combustibles fósiles continúan sin control, el nivel del mar podría elevarse 120 metros, los océanos se acidificarían y las regiones polares se volverían más templadas. Toda civilización aún existente deberá adaptarse a esas condiciones.**

TYLER JACOBSON

que los expertos auguran para las próximas décadas. Cuando el CO_2 se incorpora a los océanos, reacciona con el agua y produce ácido carbónico. En concentraciones elevadas, este puede provocar la disolución de las conchas y los esqueletos de un gran número de organismos marinos; sobre todo, en aquellos que se componen de aragonito, una de las formas solubles del carbonato cálcico.

Los expertos estiman que más de un cuarto de las especies marinas pasan parte de su vida en arrecifes de coral. El esqueleto de los corales se compone de aragonito. Aun en el caso de que las condiciones químicas no se deteriorasen tanto como para disolver las conchas, la acidificación podría dificultar que dichos organismos las formaran. En pocas décadas, no quedará en el océano ninguna región que goce de las mismas condiciones químicas que en el pasado favorecieron el crecimiento de los corales. Se desconoce qué fracción de las especies que hoy dependen de los corales desaparecerán junto con los arrecifes.

Las modificaciones en la química marina afectarán principalmente a la vida en los arrecifes, pero el resto de las especies también experimentaremos cambios. En cierto modo, podemos decir que el agua se comporta como el mercurio de un termómetro: sube cuando se calienta. El mar también se está nutriendo del agua que hoy contienen los casquetes polares.

En las épocas pasadas que se caracterizaron por una elevada concentración de CO_2, la Tierra era tan cálida que había animales similares a los cocodrilos al norte del círculo polar ártico. Hace unos cien millones de años, la temperatura media anual en los polos alcanzaba los 14 grados Celsius, con temperaturas estivales superiores a los 25 grados. A lo largo de miles de años, un clima semejante acabaría fundiendo las capas de hielo de Groenlandia y de la Antártida. Si se derritiesen por completo, el nivel del mar subiría 120 metros, lo que anegaría extensas regiones continentales. El peso que el agua ejercería sobre ellas las empujaría hacia el manto, por lo que el mar se adentraría aún más.

Se espera que los polos se calienten unas 2,5 veces más rápido que el conjunto del planeta. El Ártico ya ha experimentado mayores aumentos de temperatura que cualquier otra región: unos 2 grados, frente a los 0,8 de media global. Al final de la última glaciación, cuando el clima tardó milenios en calentarse unos 5 grados, la velocidad a la que se fundieron las capas de hielo implicó que el nivel del mar creciese a un ritmo de un metro por siglo. Creemos —y esperamos— que esta vez el hielo no se derretirá a una velocidad mayor, pero no podemos estar seguros.

A LA CAZA DE VENUS

A lo largo de los últimos millones de años, el clima ha experimentado oscilaciones que han conllevado la expansión y con-

tracción de las grandes capas glaciares. Las emisiones de gases de efecto invernadero suponen un martillazo para un sistema tan complejo. Aquí hemos considerado un escenario en el que el clima evoluciona con relativa suavidad, pero no cabe excluir cambios más drásticos que superen la capacidad de resiliencia de los sistemas biológicos, sociales y políticos.

Supongamos que el calentamiento del Ártico provocase una rápida inyección a la atmósfera de cientos de miles de millones de toneladas de metano, procedentes del lecho marino y los suelos de la región. Cada molécula de metano en la atmósfera retiene el calor unas 37 veces mejor que el CO_2. Si el metano se liberase de manera súbita, tal y como parece haber ocurrido en un episodio de calentamiento que tuvo lugar hace 55 millones de años (el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno), sí podríamos experimentar un calentamiento verdaderamente catastrófico. La mayoría de los científicos, no obstante, consideran que se trata de un riesgo remoto.

Algunos investigadores han sugerido que ciertos mecanismos de retroalimentación, como el deshielo del permafrost, podrían provocar un efecto invernadero descontrolado que podría acabar en la evaporación de los océanos. Debido a que el vapor de agua es también un gas de efecto invernadero, un ciclo hidrológico tan intenso calentaría tanto el planeta que el vapor de agua atmosférico jamás precipitaría. En tal caso, el CO_2 procedente de los volcanes y otras fuentes continuaría acumulándose. Los rayos cósmicos disociarían las moléculas del vapor de agua más alto y el hidrógeno escaparía al espacio. El clima de la Tierra acabaría pareciéndose al de su vecino Venus.

Por fortuna, el riesgo de que el océano se evapore a causa de las emisiones actuales de gases de efecto invernadero no es ni siquiera remoto. En términos sencillos, el calentamiento planetario por acción del CO_2 tiene un límite. Una vez que las concentraciones de CO_2 y vapor de agua han aumentado lo suficiente, las moléculas dispersan cada vez más los rayos solares, de modo que impiden que el planeta continúe calentándose.

Pero, si continuamos quemando combustibles fósiles, las concentraciones de gases de efecto invernadero alcanzarán valores desconocidos desde el Cretácico. En aquella época, existían mares interiores que inundaban vastas áreas de una Tierra cálida y húmeda. Reptiles gigantes nadaban en los océanos. En el continente, los dinosaurios se alimentaban de una exuberante vegetación. Si durante los próximos siglos quemamos el uno por ciento del carbono orgánico contenido en las capas sedimentarias, acabaremos respirando las mismas concentraciones de CO_2 que inhalaron los dinosaurios y disfrutaremos de temperaturas similares.

En comparación con el calentamiento gradual que ha afectado a climas de tipo invernadero en el pasado, el cambio climático industrial está ocurriendo de la noche a la mañana. En la historia geológica, la transición de una atmósfera pobre en CO_2 a otra con concentraciones elevadas ha ocurrido generalmente a velocidades inferiores a 0,00001 grados al año. Hoy, estamos recreando el mundo de los dinosaurios 50.000 veces más rápido.

¿Qué vida prosperará en semejante invernadero? Algunos organismos, como las ratas y las cucarachas, son generalistas invasivos que sacan provecho de cambios bruscos en el entorno. Otros, como los corales y un gran número de las especies que pueblan los bosques tropicales, han evolucionado para desarrollarse en condiciones muy restringidas. Probablemente, las especies invasivas terminarán transformando dichos ecosistemas a causa del calentamiento. El cambio climático podría conducirnos hacia un mundo de malas hierbas.

También nuestra civilización se encuentra en peligro. Pensemos en los mayas. Ya antes de la llegada de los europeos, su civilización había comenzado a decaer a causa de cambios moderados en el clima, pues no pudieron adaptarse a una leve disminución de las precipitaciones. Los mayas no constituyen el único ejemplo de una civilización que no ha conseguido acomodarse a los cambios en el clima. Las crisis climáticas del futuro probablemente serán de carácter regional. Si la diferencia entre ricos y pobres aumenta, ¿se producirán migraciones masivas que acaben con la estabilidad política y económica? Algunos de los países que con mayor probabilidad sufrirán las consecuencias del cambio climático poseen armas nucleares. ¿Podría el cambio climático exacerbar las tensiones y disparar un conflicto nuclear u otro tipo de enfrentamiento apocalíptico? La respuesta social al cambio climático tal vez acarree mayores problemas a la humanidad que el cambio climático en sí.

VOLVER A EMPEZAR

Las plantas leñosas que prosperaron durante el Cretácico terminaron muriendo. Con el tiempo, algunas de ellas se transformaron en carbón. El plancton acabó enterrado entre los sedimentos y una parte de él se convirtió en petróleo y gas. El planeta se fue enfriando a medida que la vida marina aprisionaba el CO_2 en conchas y esqueletos.

Durante miles de años, los océanos absorberán gran parte de nuestras emisiones de CO_2. La acidificación resultante disolverá los minerales de carbonato, y los efectos químicos de dicha disolución facilitarán la absorción de más CO_2. A pesar de ello, la concentración atmosférica de CO_2 permanecerá muy por encima de los niveles preindustriales (unas 280 partes por millón) durante varias decenas de milenios. Como resultado, la sucesión de períodos glaciales que hasta ahora han venido provocando las sutiles variaciones de la órbita terrestre cesará. Las emisiones de la humanidad mantendrán el planeta encerrado en un invernadero.

Con el tiempo, unas temperaturas más elevadas y unas precipitaciones más intensas acelerarán la tasa de disolución del sustrato rocoso y de los suelos. Los ríos transportarán hasta el océano las rocas y los minerales disueltos, que contendrán elementos como calcio y magnesio. Tal vez, dentro de cientos de miles de años, algún organismo del lecho marino aproveche el calcio y el dióxido de carbono para secretar una concha de carbonato. Su concha, unida a millones más, terminará formando un estrato de roca caliza. Del mismo modo que los acantilados de Dover constituyen un vestigio de la atmósfera cretácica, la inmensa mayoría del carbono procedente de la quema de combustibles fósiles acabará convertida en capa rocosa: un testigo, esculpido en piedra, de un mundo transformado por una sola especie.

PARA SABER MÁS

Oceanography: Anthropogenic carbon and ocean *p*H. Ken Caldeira y Michael E. Wickett en *Nature*, vol. 425, pág. 365, 25 de septiembre de 2003.
Climate change 2007: The physical science basis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, 2007. En castellano en: **www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/contents.html**
The long thaw. David Archer. Princeton University Press, 2010.

FÍSICA

Más allá del horizonte cuántico

Antaño considerada indicadora de los límites de acceso a la realidad, la teoría cuántica está ampliando el potencial de la computación y las perspectivas del conocimiento

David Deutsch y Artur Ekert

[redacted]



A finales del siglo xix, un artista anónimo realizó un grabado que mostraba a un viajero cruzando el horizonte, la frontera entre la tierra y el cielo. Arrodillado en un estilizado paisaje cotidiano, el hombre asoma su cabeza hacia el firmamento, donde se hallan los engranajes del mundo. La imagen, conocida como grabado de Flammarion, ilustra la búsqueda del saber. Las interpretaciones posibles de esta metáfora visual nos conducen a dos nociones muy diferentes del conocimiento.

La divisoria que aparece en la imagen puede entenderse como una frontera ficticia que, en realidad, la ciencia siempre acaba cruzando. Pero puede también interpretarse como una barrera real, solo franqueable por medio de la imaginación. A la luz de esta última interpretación, el artista estaría sugiriendo que nos hallamos atrapados en una burbuja cerrada, de objetos y sucesos conocidos. Podemos aspirar a comprender el mundo de la experiencia directa, pero el infinito que yace más allá resultaría inaccesible a la exploración y al entendimiento. ¿Trasciende la ciencia lo cotidiano y nos revela nuevos horizontes o, más bien, nos muestra los límites de nuestra prisión, en una lección de conocimiento limitado e infinita humildad?

La teoría cuántica se ha propuesto a menudo como argumento definitivo en favor del segundo punto de vista. En sus comienzos, los físicos asentaron la tradición de enseñar a sus estudiantes una teoría cargada de una deliberada irracionalidad: «Si usted cree que ha entendido la teoría cuántica, entonces es que no ha entendido nada»; «No podemos preguntarnos tales cosas»; «La teoría es inescrutable y, como tal, también el mundo»; «Las cosas ocurren sin razón o explicación». Al menos, así lo han proclamado los libros de texto y numerosas explicaciones de carácter divulgativo.

Sin embargo, los avances logrados durante las últimas dos décadas contradicen esa imagen. A lo largo de la historia de esta disciplina, los físicos han dado por sentado que las limitaciones que impone la teoría cuántica nos impedirían dominar la naturaleza con el rigor al que la física clásica nos tenía acostumbrados. No obstante, ninguna de esas limitaciones se ha materializado. Antes bien, la mecánica cuántica ha supuesto una liberación. Desde un punto de vista fundamental, las propiedades cuánticas de la materia (como la superposición, el entrelazamiento o la aleatoriedad) han demostrado ser más un recurso que una limitación. Gracias a ellas hemos conseguido diseñar todo tipo de objetos milagroso, como láseres y microcircuitos.

Pero eso no ha supuesto más que el comienzo. Ahora estamos empezando a usar los fenómenos cuánticos para diseñar nuevos métodos de comunicación y sistemas de computación cuya potencia de cálculo se antojaba imposible desde una perspectiva clásica. Estamos descubriendo nuevas formas de controlar la naturaleza y acceder al conocimiento.

MÁS ALLÁ DE LA INCERTIDUMBRE

Gordon Moore, cofundador de Intel, vaticinó en 1995 que el número de transistores de un microprocesador se multiplicaría por dos cada dos años, aproximadamente. La predicción, hoy conocida como ley de Moore, se ha venido cumpliendo durante más de medio siglo. Sin embargo, desde el principio desató señales de



GOÑI MONTES

alarma: si se proyecta sin más hacia el futuro, la ley de Moore implica que llegará un momento en el que los transistores tendrán el tamaño de un átomo. ¿Y entonces? Los ingenieros habrían de adentrarse en los dominios de lo desconocido.

Desde una perspectiva tradicional, el principio de incertidumbre impone un límite que ningún progreso técnico podrá franquear jamás: cuanto más sepamos acerca de algunas propiedades de las partículas, como su posición, menos podremos conocer otras, como su velocidad. Y aquello que ignoramos resulta imposible de controlar. La manipulación de objetos microscópicos se enfrenta así con un azar desenfrenado, con correlaciones imposibles desde un punto de vista clásico y con el colapso de la relación entre causa y efecto. Se sigue una conclusión ineludible: nos hallamos ante el fin inminente del progreso técnico.

Hoy, sin embargo, los físicos controlan el mundo cuántico con gran precisión sin



David Deutsch, profesor de física de la Universidad de Oxford, es uno de los padres de la teoría cuántica de la computación. Fue el primero en concebir una máquina cuántica universal, una versión cuántica de la máquina universal de Turing.



Artur Ekert ha destacado por sus investigaciones sobre la aplicación de estados cuánticos entrelazados a la criptografía. Reparte su tiempo entre Oxford y Singapur, donde dirige el Centro de Tecnología Cuántica de la Universidad Nacional de Singapur.

EN SÍNTESIS

La mecánica cuántica se ha presentado históricamente como una teoría de límites, la cual impone una incertidumbre inherente a nuestras observaciones.

Tales prejuicios encuentran su origen en doctrinas filosóficas como el positivismo lógico, muy en boga durante la época en la que se gestó la mecánica cuántica.

En realidad, la teoría cuántica no impone límites estrictos. Su riqueza es tal que permite desarrollar nuevas técnicas y adquirir nuevos conocimientos.

toparse con esta barrera. Codificamos información en un solo átomo o en partículas elementales y, a pesar del principio de incertidumbre, la procesamos con suma precisión, lo que en ocasiones da lugar a modos de funcionamiento imposibles de lograr con otros medios. Pero ¿cómo?

Consideremos con detenimiento la unidad básica de información tal y como suele concebirse: el bit. Para un físico, un bit es un sistema que puede prepararse en uno de dos estados diferentes, los cuales representan los valores lógicos «sí» y «no», «verdadero» y «falso», 0 y 1. En un ordenador digital, la presencia o ausencia de carga entre las placas de un condensador puede usarse a modo de bit. En un átomo, podemos emplear dos de los estados de un electrón: el 0 queda representado por el estado de energía mínima, o fundamental, y el 1, por algún estado excitado, de mayor energía.

Para manipular esa información, el átomo se bombardea con pulsos de luz. Un pulso con la frecuencia, amplitud y duración correctos, denominado pulso π, cambia el estado del sistema de 0 a 1, y viceversa. Las frecuencias pueden ajustarse para manipular dos átomos en interacción, de forma que uno de ellos controle el comportamiento del otro. Ello nos proporciona todos los elementos que necesitamos para construir las puertas lógicas que actúan sobre uno y dos bits, los ladrillos básicos de los ordenadores clásicos, sin tener que vérnoslas con el principio de incertidumbre.

Para entender qué ha hecho posible semejante hazaña en la carrera hacia la miniaturización, primero debemos acotar con claridad lo que el principio de incertidumbre dice y lo que no dice. En todo instante, el átomo —o cualquier otro sistema— posee ciertas propiedades, denominadas *observables*, que bajo ciertas circunstancias pueden ser «nítidas»; es decir, que pueden tomar un valor único y bien definido. El principio de incertidumbre no prohíbe la existencia de observables nítidos, se limita a afirmar que no todos los observables pueden ser nítidos a la vez. En el ejemplo del átomo, el observable bien definido es la energía: tanto en el estado 0 como en el 1, el electrón posee una energía carente de toda ambigüedad. Otros observables, como la posición o la velocidad, no se encuentran bien definidos: el electrón se encuentra deslocalizado y su velocidad comprende un abanico de valores diferentes al mismo tiempo. Si intentásemos almacenar información empleando la posición y la velocidad, nos toparíamos con un límite cuántico. Pero si, en vez de sumirnos en la desesperación, elegimos con cuidado los observables que vamos a usar como bits, hallaremos una salida.

La situación recuerda al chiste en el que un paciente le dice al doctor: «Me duele cuando hago esto», y el médico responde: «Pues no lo haga». Si algunas propiedades de las partículas no pueden determinarse con precisión, la solución consiste en no usarlas para guardar información y, en su lugar, emplear otras.

MÁS ALLÁ DE LOS BITS

Si nuestro objetivo consiste en construir un ordenador clásico, pero con átomos en vez de transistores, todo lo que necesitamos son unos observables nítidos. Pero la mecánica cuántica nos brinda más posibilidades: nos permite también usar aquellos observables que no se encuentran bien definidos. La posibilidad de que un observable pueda tomar más de un valor en un momento dado nos abre nuevos caminos.

La energía, por ejemplo, suele corresponder a un observable nítido. Sin embargo, podemos convertirlo en uno que no lo sea. Además de encontrarse en el estado fundamental o en el excitado, un átomo puede hallarse en una superposición de ambos, en los dos estados a la vez. El estado del electrón sigue estando perfectamente definido. Pero, en vez de corresponder a un 0 *o* a un 1, representa un 0 *y* un 1.

Cualquier objeto físico exhibe esa propiedad, pero uno cuyos estados puedan prepararse, manipularse y medirse recibe el nombre de bit cuántico, o *qubit*. Los pulsos de luz pueden usarse no solo para provocar la transición de un valor definido de la energía a otro, sino para cambiar el valor de la energía de bien definido a no definido, y viceversa. Mientras que un pulso π intercambia los estados 0 y 1, un pulso de la misma frecuencia pero con la mitad de amplitud o duración, conocido como pulso π/2, convierte el estado del electrón en una superposición de 0 y 1.

Si decidimos medir la energía del electrón en dicho estado, obtendremos bien la energía del estado fundamental, o bien la del estado excitado, ambas con idéntica probabilidad. En tal caso, chocaremos con el azar. Pero, una vez más, podemos salvar el obstáculo y, al hacerlo, estaremos creando una nueva función. En lugar de medir la energía del electrón en esa superposición, dejaremos que permanezca en ese estado. Si, por ejemplo, comenzamos con un electrón en el estado 0, podemos enviar un pulso π/2 y, después, un segundo pulso π/2. Si ahora medimos la ener-

gía del electrón, comprobaremos que este se encuentra en el estado 1 en el cien por cien de los casos. El observable se torna nítido de nuevo.

Para apreciar la relevancia del proceso descrito, consideremos la puerta lógica más básica que existe: un inversor, o puerta NOT. La información de salida es la negación de la entrada: un 0 se convierte en un 1, y viceversa. Imagine que alguien le encarga la tarea de diseñar la «raíz cuadrada» de una puerta NOT: una que al actuar dos veces sobre una entrada, la niegue. Por más que se afane, encontrará que dicho objetivo resulta inalcanzable en un mundo clásico. Sin embargo, dos pulsos $\pi/2$ ejercen exactamente dicho efecto. Los físicos experimentales han construido esta y otras puertas lógicas imposibles de lograr con medios clásicos empleando qubits formados por fotones, iones en trampas, átomos y espines nucleares [*véase* «Computación cuántica con iones», por Christopher R. Monroe y David J. Wineland; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2008]. Estos constituyen los ladrillos básicos de los ordenadores cuánticos.

MÁS ALLÁ DE LA COMPUTACIÓN CLÁSICA

Para resolver un problema, un ordenador —clásico o cuántico— procede de acuerdo con un algoritmo: un conjunto preciso de instrucciones. La eficiencia de un algoritmo se cuantifica según el ritmo al que aumenta el tiempo necesario para resolver el problema a medida que crece el tamaño de los datos de entrada. Con el algoritmo para multiplicar que todos aprendemos en la escuela, el tiempo que lleva multiplicar dos números de n cifras resulta proporcional al cuadrado del número de dígitos, n^2. Sin embargo, el algoritmo más rápido que conocemos para realizar la operación contraria (descomponer un número de n cifras en sus factores primos) exige un tiempo que aumenta de manera exponencial con el número de dígitos: aproximadamente, como 2^n. Esto último se considera muy ineficiente.

Gracias a las nuevas puertas lógicas, la mecánica cuántica ha posibilitado la aparición de nuevos algoritmos. Uno de los ejemplos más impactantes nos lo proporciona la factorización en números primos. En 1994, Peter Shor, de los Laboratorios Bell, halló un conjunto de instrucciones que permitían factorizar un número de n dígitos en un tiempo que solo crecía como n^2. Para otros problemas, como el de buscar un elemento entre una larga lista de

SOLUCIONES

Supuestos límites en computación cuántica

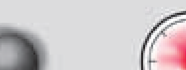
En el pasado se ha señalado a la mecánica cuántica como el principal obstáculo en la progresiva miniaturización de la electrónica. Sin embargo, es en el límite cuántico donde los ordenadores logran una velocidad de cálculo inalcanzable en computación clásica. Aunque la construcción de un ordenador cuántico aún se halla plagada de sutilezas, hasta ahora ningún obstáculo se ha mostrado verdaderamente insalvable.

Principio de incertidumbre

PROBLEMA: El principio de incertidumbre de Heisenberg limita la precisión de ciertas mediciones. Si conocemos con total exactitud la posición de una partícula, su velocidad tomará un abanico de valores; si determinamos su momento, la posición se tornará borrosa. Dichas variables no proporcionan un buen método para almacenar información.

Posición bien definida

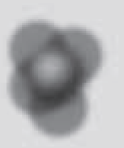
Velocidad borrosa



Posición borrosa

Velocidad bien definida

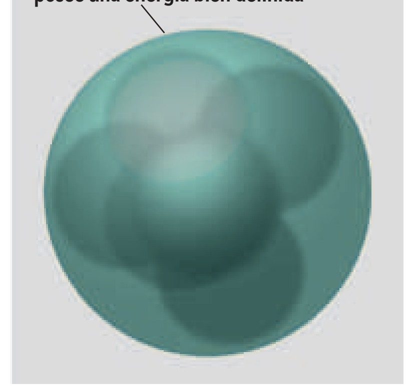






SOLUCIÓN: Algunas mediciones cuánticas no se hallan sujetas a tales restricciones. Cuando la posición y la velocidad son inciertas, otras propiedades, como la energía, pueden estar bien definidas. Cuando la energía también adolece de indeterminaciones, otras variables pueden resultar adecuadas.

Un electrón en un orbital atómico posee una energía bien definida



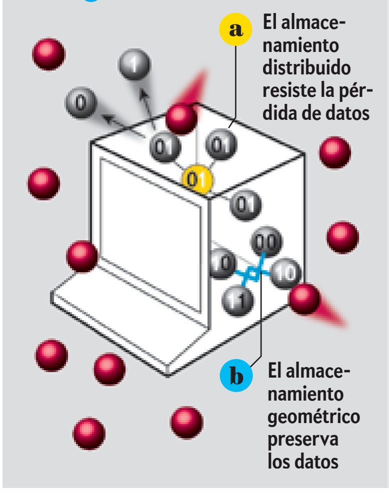
Decoherencia

PROBLEMA: Las partículas de un ordenador cuántico tienden a interaccionar con el entorno y disipar la información, lo que echa a perder el proceso de cálculo.

Las interacciones disipan la información del sistema



SOLUCIÓN: Existen procedimientos de corrección de errores que pueden compensar los efectos de la decoherencia durante el tiempo requerido para llevar el cálculo a término. La información puede repartirse entre varias partículas **a** o codificarse en una configuración geométrica que resulte inmune al ruido **b**.



JEN CHRISTIANSEN

LÓGICA CUÁNTICA

¿Puertas lógicas imposibles?

Un ordenador clásico no solo puede efectuar tareas imposibles para un ordenador clásico, sino también llevar a cabo operaciones que trascienden la lógica clásica. En este ejemplo, dos estados de un electrón en un átomo representan el 0 y el 1 de un bit. En ninguno de ellos posee el electrón una posición o una velocidad bien definidas: su posición se esparce sobre una región esférica u ovalada, el orbital, en la que la velocidad toma varios valores a la vez. Sin embargo, cada estado posee una energía diferente cuyo valor determina el estado del bit.

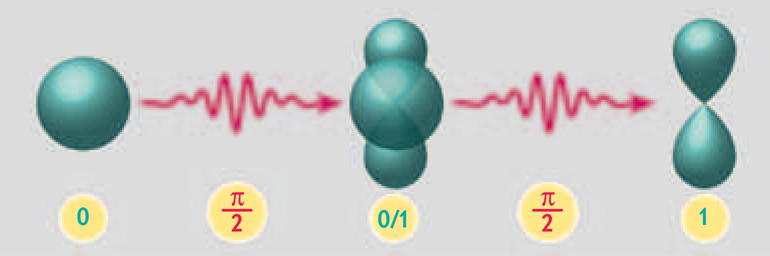
Puerta NOT ordinaria

Para realizar la operación lógica más sencilla, la negación (invertir el valor del bit de entrada), se envían al átomo pulsos de luz con la intensidad, frecuencia y duración adecuadas («pulsos π»). Si el electrón comienza en el estado 1, acabará en el 0, y viceversa.



Raíz cuadrada de una puerta NOT

La computación cuántica permite fabricar una puerta lógica aparentemente imposible: la «raíz cuadrada» de la negación, una puerta que devuelve el estado contrario tras ser aplicada dos veces. Un pulso $\pi/2$, de menor duración o intensidad que un pulso π, hace que el electrón pase del estado 0 a una superposición de 0 y 1. Después, un segundo pulso envía al electrón al estado contrario al de partida.



JEN CHRISTIANSEN

ellos, los algoritmos cuánticos superan también a los clásicos, aunque no de manera tan rotunda. En general, no todos los algoritmos cuánticos se muestran tan eficientes; algunos, de hecho, no son en absoluto más rápidos que sus equivalentes clásicos [*véase* «Los límites de la computación cuántica», por Scott Aaronson; Investigación y Ciencia, mayo de 2008].

En todo caso, la primera aplicación práctica de un ordenador cuántico probablemente no consista en factorizar un número, sino en simular el comportamiento de otros sistemas cuánticos, una tarea que un ordenador clásico solo puede llevar a cabo en un tiempo exponencial. En los próximos años tal vez veamos cómo las simulaciones cuánticas revolucionan varias líneas de investigación, desde el desarrollo de medicamentos hasta el diseño de nuevos materiales.

Los escépticos de la computación cuántica hablan con frecuencia del arduo problema que supone encadenar puertas lógicas cuánticas. Aparte de las dificultades de trabajar con un solo átomo o fotón, el obstáculo principal consiste en evitar que las correlaciones cuánticas se disipen a través de su interacción con el ambiente, lo que echa a perder el cálculo. Este proceso, la decoherencia, suele considerarse un límite fundamental de la computación cuántica. No lo es. La misma teoría cuántica nos brinda métodos para corregir los errores provocados por la decoherencia. Si las fuentes de error satisfacen ciertas condiciones que, de hecho, podrían lograrse con diseños ingeniosos (si los errores aleatorios apareciesen de forma independiente en cada qubit, o si las puertas lógicas gozasen de la precisión requerida), conseguiremos construir ordenadores cuánticos a prueba de errores. Ello nos permitiría confiar en sus cálculos durante períodos de tiempo tan largos como fuese necesario.

MÁS ALLÁ DEL CONOCIMIENTO MATEMÁTICO

El ejemplo de las puertas lógicas «imposibles» ilustra algo sorprendente en la historia de la computación: al aumentar nuestro conocimiento de la realidad física, también mejora nuestra comprensión del mundo abstracto de la lógica y las matemáticas. Con toda seguridad, la mecánica cuántica transformará estas áreas, al igual que ya ha ocurrido con la física y la ingeniería.

Ello se debe a que, aunque las *verdades* matemáticas son independientes de la física, nosotros cobramos *conocimiento* de ellas por medio de procesos físicos; por ello, cuáles de ellas podamos conocer dependerá de las leyes físicas. Una demostración matemática consta de un conjunto de operaciones lógicas. Por tanto, la demostrabilidad de un enunciado dependerá de qué operaciones lógicas (como NOT) nos permitan implementar las leyes de la física. Desde un punto de vista físico, tales operaciones deben ser tan simples que nos permitan saber, sin necesidad de una demostración, qué significa llevarlas a cabo. Y este último juicio radica en nuestra comprensión del mundo físico. Al expandir nuestro abanico de procesos elementales con nuevas puertas lógicas, como la raíz cuadrada de NOT, la física cuántica permite a los matemáticos asomarse a una frontera que antes creíamos confinada al mundo abstracto de las demostraciones. Ello les permitirá ver y demostrar verdades que, de otro modo, permanecerían ocultas para siempre.

Imaginemos que la solución a cierto problema matemático requiere conocer los factores primos de un número enorme, N. Hablamos de un número tan grande que, aunque empleásemos toda la materia del universo para construir un ordenador clásico y este calculase durante un tiempo igual a la edad del cosmos, ello no bastaría para factorizarlo. Sin embargo, un ordenador cuántico podría resolver el problema con rapidez. Cuando los matemáticos publicasen la solución del problema, tendrían que limitarse a hacer constar los factores primos como si saliesen de la nada: «He aquí los dos enteros cuyo

producto es *N*», ya que ninguna cantidad de papel en el universo bastaría para escribir los pasos que hicieron posible dar con dichos factores.

En el ejemplo anterior, es un ordenador cuántico lo que proporciona la clave para resolver el problema. Sin esa factorización, que ningún procedimiento clásico realista podría proporcionar jamás, el problema seguiría sin resolver. Hoy, algunos matemáticos consideran su trabajo como una ciencia empírica, donde los resultados proceden no solo del razonamiento puro, sino también de experimentos realizados con sumo cuidado [*véase* «La muerte de la demostración», por John Horgan; Investigación y Ciencia, diciembre de 1993]. La mecánica cuántica no solo supone un salto cualitativo en esta estrategia, sino que la hace obligatoria.

MÁS ALLÁ DE LA MALA FILOSOFÍA

Si la mecánica cuántica nos abre las puertas a una nueva computación, ¿por qué los físicos se preocupan de los límites que la teoría impone al progreso científico? La respuesta se encuentra en los orígenes de la teoría cuántica misma.

Erwin Schrödinger, descubridor de una de las ecuaciones definitorias de la teoría, advirtió en cierta ocasión a su audiencia de que lo que iba a decir podría ser tomado como una locura. Comenzó a explicar que las distintas posibilidades que predice su famosa ecuación no son «alternativas, sino que todas ellas suceden a la vez». No faltan en la historia de la ciencia ejemplos de eminencias que, un buen día, perdieron el contacto con la realidad. Pero, en esta ocasión, lo que hizo nuestro premio nóbel de 1933 no debería considerarse como más que una modesta reivindicación: que la ecuación que hubo de merecerle el premio Nobel proporcionaba una descripción correcta de los hechos. Schrödinger sintió la necesidad de defenderse no por haber interpretado su ecuación de manera irracional, sino justo por lo contrario.

¿Cómo puede una afirmación tan inocente convertirse en algo descabellado? Simplemente porque la mayor parte de la física había sucumbido a los encantos de la mala filosofía, a doctrinas que entorpecían la adquisición de nuevos conocimientos. La filosofía y la física fundamental se encuentran tan íntimamente relacionadas —a pesar del buen número de proclamas en contra por parte de ambos bandos— que, cuando la corriente filosófica de moda se desmoronó a principios del siglo xx, arrastró consigo a parte de la física teórica.

Los culpables fueron doctrinas como el positivismo lógico («si no puede confirmarse mediante un experimento, carece de sentido»), el instrumentalismo («si las predicciones funcionan, ¿por qué preocuparnos de lo que nos ha llevado hasta ellas?») y el relativismo («no hay afirmaciones objetivamente ciertas o falsas, solo legitimadas o deslegitimadas por una determinada cultura»). El daño provino de lo que dichas doctrinas tenían en común: la negación del realismo, la postura filosófica de sentido común que afirma que existe un mundo físico y que el método científico permite extraer conocimiento de él.

Fue en esa atmósfera en la que Niels Bohr desarrolló una interpretación influyente de la mecánica cuántica, la cual negaba la posibilidad de dotar a los fenómenos de existencia objetiva. No estaba permitido hablar de los valores de una variable cuántica cuando no se la observaba (como, por ejemplo, en mitad de un cálculo cuántico). Los físicos que, en virtud de la naturaleza de su profesión, no podían contener sus deseos de preguntar, intentaron hacerlo lo menos posible. Y la mayoría de ellos instruyó a sus estudiantes para que se abstuvieran de formular ese tipo de cuestiones. La teoría más avanzada del área más fundamental de la ciencia fue interpretada como una estridente negación de los conceptos de verdad, explicación y realidad física.

No toda la filosofía abandonó el realismo. Bertrand Russell y Karl Popper fueron dos notables excepciones. Tampoco todos los físicos cejaron en su empeño. Albert Einstein y David Bohm resistieron la embestida. Hugh Everett propuso que las cantidades físicas tomaban de veras más de un valor al mismo tiempo (el mismo punto de vista que nosotros adoptamos). En su conjunto, sin embargo, los filósofos no mostraron interés por la realidad. Y aunque los físicos continuaron aplicando la teoría cuántica a otras áreas, la investigación acerca de la naturaleza de los procesos cuánticos en sí mismos perdió fuelle.

La situación ha mejorado poco a poco durante las últimas décadas. Esta vez, ha sido la física la que ha ido encauzando de nuevo a la filosofía. El ser humano desea comprender la realidad con independencia de con cuánta vehemencia se niegue su existencia. Por fin, estamos cruzando los supuestos límites ante los que la mala filosofía de antaño nos enseñó a resignarnos.



CORBIS

Grabado de Flammarion: Esta ilustración anónima, publicada por primera vez a finales del siglo xix en un texto sobre meteorología de Camille Flammarion, ilustra el deseo humano por el conocimiento. ¿Es posible traspasar la frontera de lo cotidiano y acceder a los engranajes del mundo?

¿Que sucedería si la teoría fuese rebatida, si alguna limitación aún más profunda frustrase nuestros intentos de construir un ordenador cuántico cada vez mayor? Nos encantaría ver algo así; sin duda es la posibilidad más interesante de todas. En tal caso, no solo deberíamos revisar los cimientos de la física moderna, sino que nos hallaríamos ante las puertas de un tipo de computación aún más fascinante. Si algo detiene algún día a la mecánica cuántica, tendremos a nuestra disposición una teoría más allá de la mecánica cuántica, a la que seguirán ordenadores más allá de los ordenadores cuánticos. De una forma o de otra, el progreso y el conocimiento jamás conocerán límites.

PARA SABER MÁS

The physics of quantum information. Quantum cryptography, quantum teleportation, quantum computation. Dirk Bouwmeester, Arthur Ekert y Anton Zeilinger. Springer, 2000.

La estructura de la realidad. David Deutsch. Anagrama, 2002.

Quanta ciphers and computers. Arthur Ekert en *The New Physics*, dirigido por Gordon Fraser. Cambridge University Press, 2006.

El comienzo del infinito: Explicaciones que transforman el mundo. David Deutsch. Ediciones de Intervención Cultural, 2012.

The emergent multiverse: Quantum theory according to the Everett interpretation. David Wallace. Oxford University Press, 2012.

HISTORIA DE LA CIENCIA

Errores fecundos

La ciencia no avanza solo a base de aciertos. Algunas equivocaciones han ayudado a remodelar por completo una disciplina

David Kaiser y Angela N. H. Creager



Tal vez más que ninguna otra profesión, la ciencia incita a obtener resultados correctos. Por supuesto, los investigadores cometen multitud de equivocaciones a lo largo de su carrera. Pero no todas ellas nacen iguales. A lo largo de la historia, algunas ideas erróneas han demostrado ser mucho más fecundas que miles de otras que, o bien fallaron de manera banal, o bien acertaron, pero por escaso margen. Ha habido errores productivos: aquellos que, por haber hecho mella en alguna propiedad profunda de la naturaleza, atrajeron a más investigadores y acabaron propiciando grandes avances. Fueron ideas equivocadas, sin duda, pero la ciencia se encontraría mucho peor sin ellas.

Niels Bohr concibió un modelo atómico que resultó erróneo en casi todos sus aspectos; sin embargo, inspiró la revolución cuántica. En 1912, y en medio de enormes dosis de escepticismo, Alfred Wegener propuso que las fuerzas centrífugas del planeta provocarían la deriva de los continentes. Aunque no acertó con el mecanismo, el fenómeno resultó ser cierto. En los años treinta del siglo xx, Enrico Fermi pensó que había creado núcleos transuránicos; en realidad, se había topado con la fisión nuclear.




Eureka



David Kaiser es profesor de física e historia de la ciencia en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y doctor en ambas disciplinas por la Universidad Harvard.



Angela N. H. Creager enseña historia en la Universidad de Princeton, donde investiga en historia de la biología. Es doctora en bioquímica por la Universidad de California en Berkeley y ha estudiado historia de la ciencia en Harvard y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

EN SÍNTESIS

La historia de la ciencia ha conocido numerosas ideas erróneas que, sin embargo, se demostraron muy fecundas en virtud de la profundidad de sus planteamientos.

Entre las equivocaciones científicas más famosas se cuentan el modelo atómico de Bohr, la teoría original de la deriva continental o los experimentos de Enrico Fermi que condujeron a la fisión nuclear.

Este artículo analiza dos errores históricos menos conocidos: uno que propició el nacimiento de la teoría cuántica de la información y otro que, a partir de una hipótesis falsa sobre la naturaleza de los virus, acabó demostrando el carácter darwinista de la evolución bacteriana.

Otros dos ejemplos de errores productivos, uno perteneciente a la física de los años setenta del siglo XX y otro a la biología de los cuarenta, resultan enormemente ilustrativos. No hablamos de científicos ineptos que, en retrospectiva, se beneficiaron de un golpe de suerte. Fueron profesionales que destacaron por plantear cuestiones que pocos colegas de profesión osaban formular y, gracias a ello, fusionaron ideas que casi nadie antes había considerado. En el proceso ayudaron a poner los cimientos de los campos hoy feraces de la biotecnología y la información cuántica. Erraron. Y el mundo debería estarles agradecido por ello.

EL FANTASMAL FOTÓN CLONADO

El primero de los errores a los que aludíamos arrojó luz sobre la acalorada disputa que, durante la gestación de la mecánica cuántica, llevó a Albert Einstein y Bohr a enzarzarse sobre los fundamentos de la teoría. Einstein despotricaba contra varias de sus extrañas propiedades; entre ellas, el hecho de que las ecuaciones pronosticasen probabilidades pero no resultados definitivos. «Yo, en cualquier caso, estoy convencido de que *Él* [Dios] no juega a los dados», reza su conocida réplica. Pero ni Einstein ni Bohr lograron convencer al otro bando, por lo que la cuestión permaneció estancada durante treinta años.

John Bell, un joven físico norirlandés, retomó el debate decenios después. Para ello, volvió a considerar un experimento mental que Einstein había publicado en 1935. En él, una fuente emitía pares de partículas, como electrones o fotones, en direcciones opuestas. Una vez que las partículas integrantes de cada par se hubiesen alejado lo suficiente, podrían medirse sus propiedades físicas. Bell se preguntó si los resultados de tales mediciones podrían hallarse correlacionados.

En 1964 publicó un breve y elegante artículo en el que demostraba que, de acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, el resultado de las mediciones efectuadas sobre una de las partículas (por ejemplo, alguna de las componentes del espín de la partícula que se mueve hacia la derecha) dependería de la propiedad que eligiésemos medir en la otra partícula.

Bell dedujo que cualquier teoría que reprodujese las predicciones empíricas de la mecánica cuántica debería incorporar la existencia de una señal o mecanismo «por medio del cual los ajustes efectuados sobre un aparato de medida puedan influir en la lectura de otro instrumento, por alejado que se encuentre». Además, dicha señal habría de propagarse «de manera instantánea». Tales correlaciones a larga distancia recibieron el nombre de entrelazamiento cuántico.

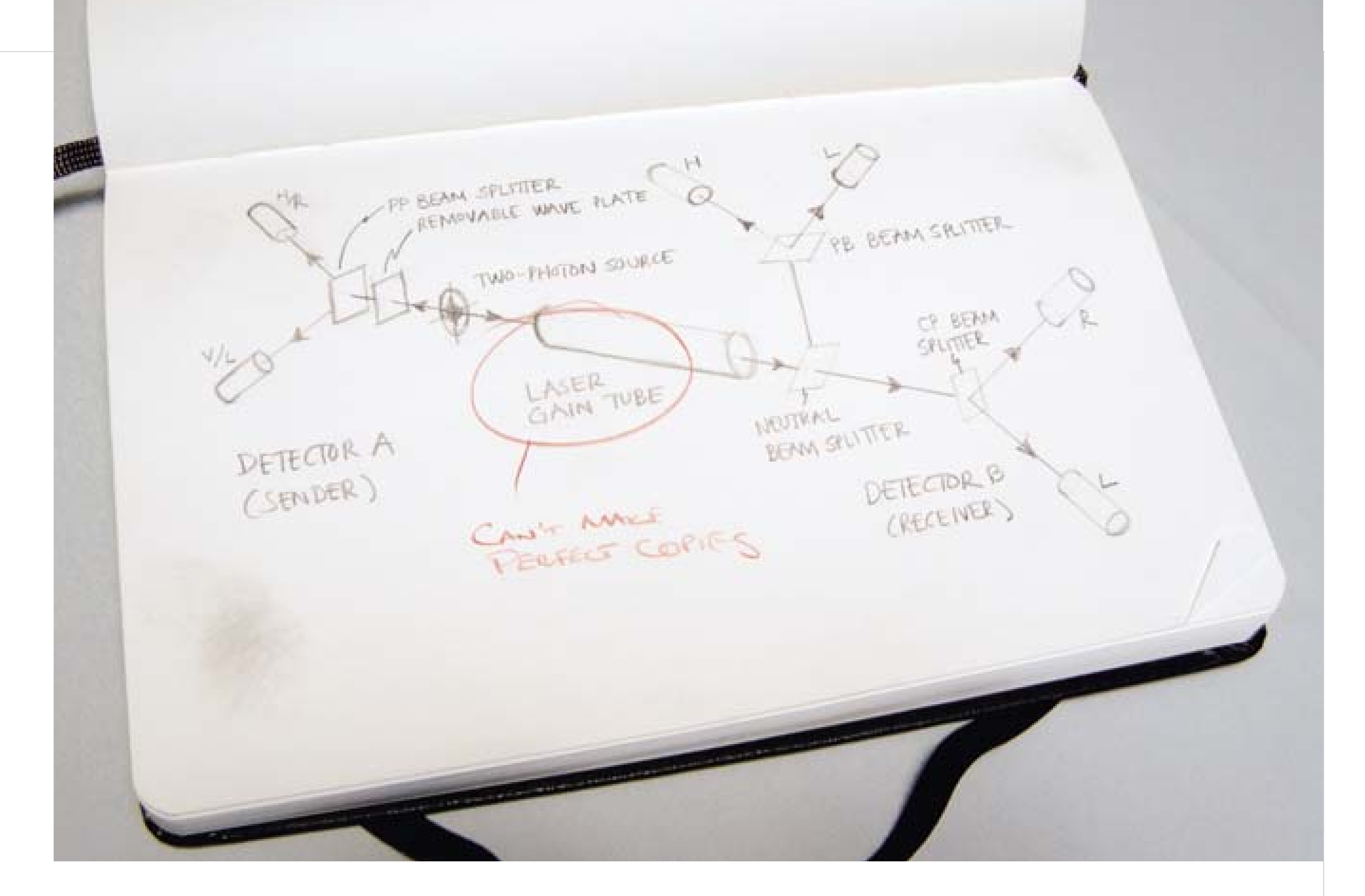
Aunque el artículo de Bell goza hoy de gran fama, en su momento no concitó demasiado revuelo, a pesar de que una transmisión instantánea de señales violaría la teoría de la relatividad, según la cual nada puede propagarse más rápido que la luz. Entre los físicos que sí le prestaron atención se contaba Nick Herbert. El asunto atrajo su interés cada vez más y comenzó a distraerle de su trabajo como físico industrial en la Bahía de San Francisco.

Por aquel entonces, Herbert formaba parte de un grupo de discusión poco convencional llamado Fundamental Fysiks Group, cuyos miembros se reunían de manera periódica en Berkeley. La mayoría de ellos eran físicos jóvenes que se habían doctorado en programas de élite (Herbert había cursado sus tesis doctoral en Stanford) solo para encontrarse después con una escasez laboral sin precedentes. En 1971 había más de mil físicos registrados en el servicio de empleo del Instituto Americano de Física que competían por 53 puestos de trabajo.

Empleados en ocupaciones que no colmaban sus expectativas y con tiempo libre, Herbert y sus compañeros se reunían una vez por semana para participar en tormentas de ideas sobre algunos de los interrogantes más profundos de la física del momento; temas sobre los que su formación académica había pasado de puntillas. El teorema de Bell y el entrelazamiento cuántico los hipnotizaron. John F. Clauser, uno de los miembros del grupo, llevó a cabo en 1972 el primer experimento que puso a prueba el teorema de Bell, lo que permitió verificar las desconcertantes predicciones relativas al entrelazamiento cuántico. (Aquellas contribuciones acabarían por merecerle en 2010 el prestigioso Premio Wolf, junto a Alain Aspect y Anton Zeilinger.)

Mientras tanto, a su alrededor, la Bahía de San Francisco experimentaba un interés sin precedentes por fenómenos como la percepción extrasensorial y la premonición del futuro. El *San Francisco Chronicle* y otros diarios de gran tirada publicaban artículos sobre experimentos telepáticos y los entusiastas del ocultismo celebraban el advenimiento de la Nueva Era. Herbert y sus compañeros comenzaron a preguntarse si el teorema de

FUENTES: DONNA COVENEY (*Kaiser*); SAGE ROSS (*Creager*)



Telégrafo instantáneo: En 1981, el físico Nick Herbert se basó en las extrañas propiedades de la mecánica cuántica para diseñar un sistema de comunicaciones superlumínico. Aunque la teoría de la relatividad de Einstein prohibía la existencia de un dispositivo así, en un primer momento nadie logró descubrir el fallo. Con el tiempo, un análisis minucioso reveló el error de Herbert: el estado de una partícula elemental jamás puede ser copiado a la perfección. Aquel descubrimiento acabaría propiciando avances fundamentales en la teoría cuántica de la información.

SCIENTIFIC AMERICAN

Bell —que parecía implicar la existencia de misteriosos vínculos instantáneos a larga distancia— no sería en última instancia el responsable de aquella serie de prodigios.

Así las cosas, Herbert se preguntó si lo que Bell había descrito como señales instantáneas entre partículas cuánticas no podría emplearse para enviar mensajes a una velocidad mayor que la de la luz. De modo que comenzó a trabajar en un «telégrafo superlumínico», un artefacto que se valdría de las propiedades de la teoría cuántica y violaría las leyes de la relatividad. Tras algunos pasos en falso, en 1981 concibió un dispositivo basado en un cuidadoso sistema de láseres, al que bautizó como FLASH, acrónimo de «primer emisor superlumínico amplificado por láser» (*first laser amplified superluminal hook-up*).

El plan de Herbert parecía impecable. Varios de los revisores de la revista a la que envió su artículo quedaron convencidos: «No hemos sido capaces de detectar ningún error fundamental en el experimento propuesto que revele el origen de la paradoja», informaron dos de ellos. Un tercero, Asher Peres, fue aún más lejos: opinó que el artículo tenía que estar mal y que, precisamente por ello, debía ser publicado. Dado que él mismo no había logrado identificar ningún fallo, argumentaba Peres, la búsqueda del error promovería nuevos avances.

La inusitada —e incluso valerosa— postura de Peres pronto rindió sus frutos. Tres grupos comenzaron a analizar el artículo de Herbert: GianCarlo Ghirardi y Tullio Weber, en Italia; Wojciech Zurek y Bill Wootters, en EE.UU., y Dennis Dieks en Holanda. Todos ellos se percataron de que Herbert había incurrido en un error al calcular la señal de llegada. El físico había supuesto que el amplificador láser emitiría grandes cantidades de luz en un estado idéntico al de la señal de partida. Sin embargo, aquella presunción resultó errónea. Un láser no puede crear clones perfectos de un único fotón, sino solo un picadillo aleatorio; como una fotocopiadora que, al fundir en una dos imágenes diferentes, generase sin remedio una mezcla borrosa.

En el proceso de elucidar la propuesta de Herbert, los tres grupos descubrieron una propiedad fundamental de la mecánica cuántica en la que nadie había reparado hasta entonces. El dispositivo FLASH fallaba debido al «teorema de la no clonación», el cual prohíbe realizar copias perfectas de un estado cuántico desconocido sin alterarlo. Dicho teorema impedía emplear la teoría cuántica para transmitir señales a una velocidad mayor que la de la luz, por lo que el entrelazamiento cuántico y la teoría de la relatividad ya podían convivir pacíficamente. Suceso a suceso, las partículas sí se disponen según los dictados de sus correlaciones; sin embargo, estas no pueden aprovecharse para enviar mensajes superlumínicos.

Muy poco después, algunos físicos se percataron de que las consecuencias del teorema de la no clonación iban más allá de solucionar la paradoja del artículo de Herbert o de sentar las bases para una incómoda tregua entre el entrelazamiento cuántico y la teoría de la relatividad. En 1984, Charles Bennett y Gilles Brassard se basaron en dicho teorema para diseñar el primer protocolo de cifrado cuántico; un método para blindar las comunicaciones digitales frente a posibles espías. Bennett y Brassard advirtieron que, dado que resultaba imposible realizar copias perfectas de estados cuánticos desconocidos, los

fotones entrelazados podrían utilizarse para codificar mensajes. Cualquier intento de interceptar un fotón y copiarlo destruiría la señal y, al mismo tiempo, delataría al intruso.

Durante los últimos años, los métodos de cifrado cuántico han pasado a ocupar un papel clave en la teoría cuántica de la información. Físicos como Anton Zeilinger, en Viena, o Nicholas Gisin, en Ginebra, han desarrollado métodos de criptografía cuántica para transferencias bancarias y sistemas de votación electrónica: un legado nada desdeñable para el desconcertante —y errado— proyecto de Herbert.

LA PARADOJA GENÉTICA

Nuestro segundo ejemplo se basa en los trabajos de Max Delbrück, profesor en la Universidad Vanderbilt y, después, en el Instituto de Tecnología de California (Caltech). Delbrück había sido estudiante de Bohr. De la célebre disertación *La luz y la vida*, pronunciada por su maestro en 1932, Delbrück extrajo la idea de que la investigación de los procesos biológicos suscitaría nuevas paradojas cuya resolución quizá condujese al descubrimiento de nuevas leyes de la física. Delbrück congregó a varios científicos en torno a aquel proyecto que, a la postre, contribuyó a sentar las bases de la biología molecular en los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial.

Una de las preguntas que asaltaban a los biólogos de los años cuarenta era: «¿Qué es un gen?». A mediados del siglo XIX, Gregor Mendel había propuesto la existencia de factores hereditarios (más tarde llamados genes) que poseerían dos características principales. La primera de ellas era su capacidad para duplicarse. La segunda, la de producir variantes, o mutaciones, las cuales se duplicaban con la misma fidelidad que el gen original.

Pero en los años cuarenta nadie sabía de cierto de qué se componían los genes ni cómo se reproducían. Tal y como Erwin Schrödinger, uno de los padres de la mecánica cuántica, había señalado en su obra de 1944 *¿Qué es la vida?*, ningún sistema físico ordinario se replica a sí mismo. De hecho, la supuesta capacidad de los genes para obrar de esa manera parecía desafiar la segunda ley de la termodinámica.

Delbrück se proponía hallar el «gen atómico», la unidad más pequeña responsable de los misterios de la herencia. Como buen físico, decidió que la mejor forma de abordar el problema consistía en estudiar las formas de vida más simples y diminutas: los virus. Delbrück se decidió por los bacteriófagos (virus que infectan bacterias), los cuales se cuentan entre los más sencillos de aislar y entre los que crecen con mayor rapidez. Aunque, al igual que los demás virus, los fagos solo se reproducen en el seno de la célula a la que infectan, Delbrück intentó obviar lo que a su modo de ver introducía una complicación innecesaria. En colaboración con Emory Ellis, desarrolló un método de cultivo que les permitiría centrarse en la reproducción del patógeno y dejar de lado las complejidades relativas a las bacterias infectadas.

Delbrück estaba convencido de que los genes eran de naturaleza proteínica. Por tanto —pensó—, si lograba entender cómo se reproducían las partes proteínicas del virus, lograría discernir la naturaleza de los genes. Y, para estudiar la replicación vírica, lo mejor sería observar a los patógenos reproducirse.

Pero ¿cómo aislar y observar un virus en el momento de su replicación? Diferentes bacteriófagos se reproducían a velocidades distintas, por lo que Delbrück y su colaborador, Salvador Luria, decidieron infectar una misma célula con dos cepas diferentes del virus. De este modo, cuando la bacteria reventase, podrían observar los estadios intermedios en el proceso de replicación de la cepa de reproducción lenta.

Pero el experimento no funcionó como habían previsto. Luria y Delbrück descubrieron que la infección por parte de una cepa inhibía la infección por parte de la otra. Fue por aquella época cuando Thomas Anderson, de la Universidad de Pensilvania, examinó al microscopio electrónico una muestra de los bacteriófagos de Delbrück y Luria. Comprobó que el virus era algo mucho más complejo que el «gen atómico» que habían imaginado: en realidad, se trataba de una partícula con forma de renacuajo, compuesta por proteínas y ácidos nucleicos, que se anclaba al exterior de las bacterias para provocar la infección. La correspondencia biunívoca entre virus y genes conjeturada por Delbrück comenzaba a desmoronarse.

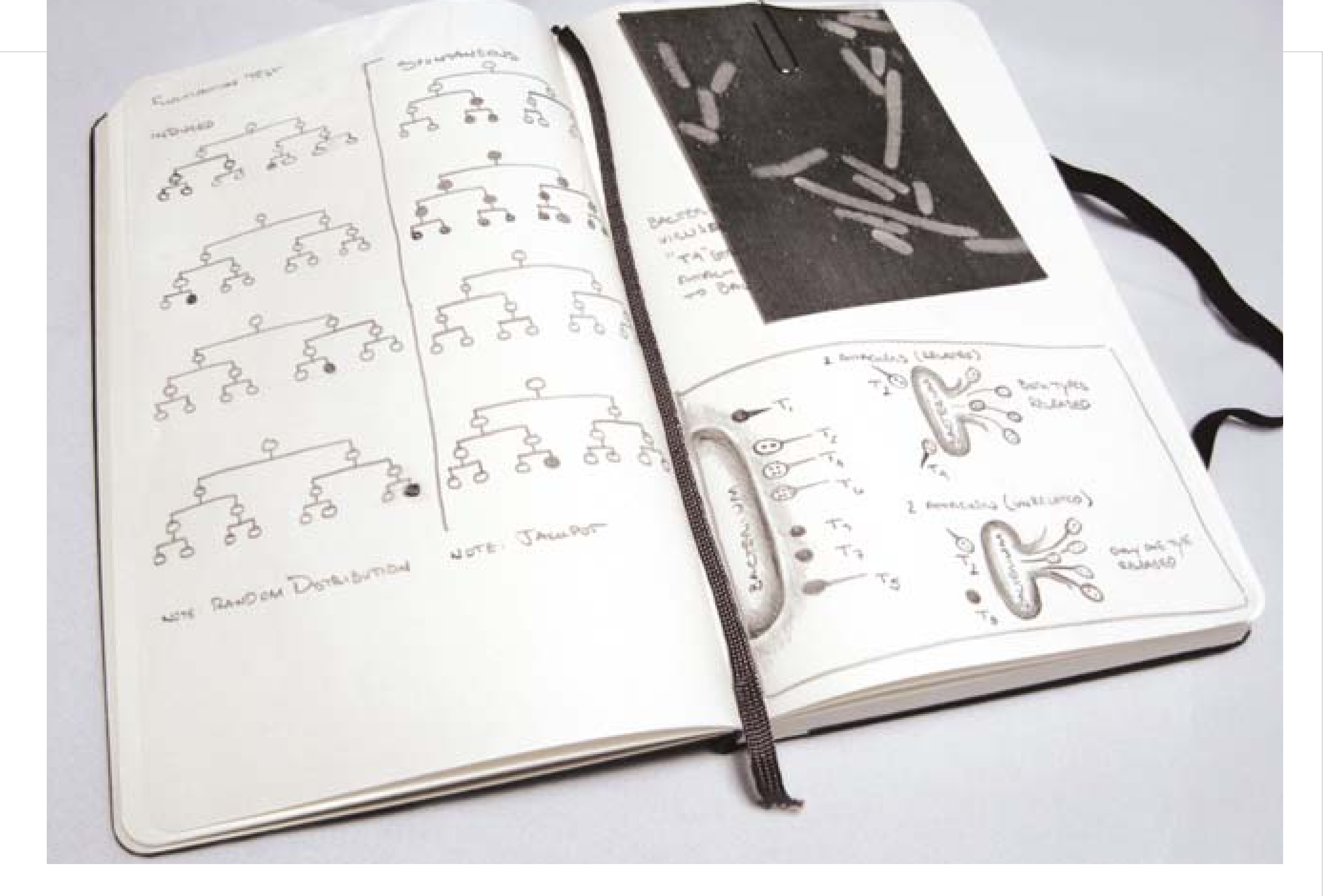
Pero Delbrück no se dejó disuadir. En un intento por comprender por qué algunas bacterias resistían la infección, Luria y él diseñaron lo que dieron en llamar un «test de fluctuación». Este acabó revelando muy poco sobre el proceso de replicación vírica, pero su ingeniosa metodología sirvió para demostrar un resultado de primer orden: que las bacterias evolucionan según principios darwinistas, en un proceso en el que experimentan mutaciones aleatorias que, en ocasiones, les confieren mayores dotes de supervivencia. El experimento de Delbrück y Luria supuso un hito en el estudio de la genética bacteriana que abrió la puerta a numerosos campos de investigación. En 1969, Delbrück y Luria recibirían (junto con Alfred Hershey) el premio Nobel, en parte gracias a aquel trabajo.

Para desesperación de Delbrück, sin embargo, el test de fluctuación no trajo consigo ningún avance en el estudio de la replicación vírica. En 1946, el científico llegó a quejarse en una conferencia de que las posibilidades «explosivas» en el estudio de las bacterias que él mismo había propiciado estaban desplazando su foco primario de atención. Además, cada vez se acumulaban más pruebas en favor de la idea de que, para reproducirse, el fago se valía de la maquinaria celular de *Escherichia coli*. Muy al contrario de lo que Delbrück había supuesto al principio, el papel de la bacteria no podía ignorarse.

Pero, a pesar de que los bacteriófagos resultaron ser muchísimo más complejos de lo que había imaginado, el instinto que le había llevado a centrarse en un sistema lo más sencillo posible se reveló sumamente fecundo. El patógeno floreció hasta convertirse en un organismo modelo que acabaría inspirando a toda una generación de biólogos y, en particular, también la carrera de James Watson en su búsqueda de la estructura del ADN. Delbrück no solo había elegido con gran acierto el objeto de su experimento, sino que ideó métodos revolucionarios para estudiarlo.

A mediados de los años cincuenta, Delbrück desistió por completo en su investigación sobre bacteriófagos y dirigió su atención hacia la biofísica de la percepción sensorial, empresa que acometió mediante el estudio del hongo *Phycomyces*. Aunque logró atraer a algunos físicos jóvenes hacia su nuevo sistema modelo, este se mostró mucho menos fructífero que el fago. Delbrück no dejó por ello de ser un crítico vivaz de los experimentos que otros investigadores estaban realizando con fagos.

Su propensión a valorar indebidamente descubrimientos importantes alcanzó cotas legendarias. Jean Weigle, biólogo molecular de Caltech, solía referir la anécdota de un joven investigador al que cierto día había hallado abatido tras departir con Delbrück. Este se había mostrado muy receptivo ante el experimento propuesto por el joven, lo cual constituía una



Test válido, causa errónea: Max Delbrück y sus colaboradores se habían propuesto averiguar la composición y naturaleza de los genes. Para ello, necesitaban trabajar con un organismo simple, por lo que se decidieron por los bacteriófagos. En 1943 idearon un test para investigar el proceso de replicación vírica. Este tomó prestadas técnicas de la mecánica cuántica para estudiar la manera en que algunas bacterias resistían la infección. El test se ha convertido en un hito experimental, pero lo es para estudiar bacterias, no virus. Delbrück se quejaría más tarde de que otros investigadores hubiesen apartado su atención de lo verdaderamente importante.

SCIENTIFIC AMERICAN

clara señal de que la idea no tenía recorrido. Para quienes iban por el buen camino, el máximo elogio que se podía esperar de Delbrück era: «No me creo ni una palabra».

RECONOCIMIENTO DEBIDO

En los dos ejemplos que hemos rememorado aquí, científicos muy capaces propusieron ideas erróneas. Lejos de tratarse de equivocaciones comunes, sus ideas espolearon avances de gran calado en varios ámbitos de la ciencia básica que, muy pronto, derivaron en programas de investigación de miles de millones de dólares e industrias enteras que aún hoy perfilan el mundo en que vivimos.

Pero la herencia que aquellos errores dejaron a sus respectivos creadores no fue la misma. Delbrück disfrutó, con toda justicia, de una carrera científica rebosante de éxito. Apreciaba los métodos poco convencionales y podía permitirse inspeccionar con una mirada crítica los trabajos científicos de mejor calidad. Su prestigio y posición le consentían la heterodoxia. Herbert, en cambio, sufría para llegar a fin de mes e incluso tuvo que recurrir durante algún tiempo a los servicios de protección social. Algo así no parece la manera más productiva de alentar a un pensador cuyo trabajo ayudó a esclarecer profundos aspectos de la teoría cuántica y que puso en marcha una revolución tecnológica.

La tremenda disparidad en las trayectorias profesionales de ambos investigadores sugiere la necesidad de concebir otros sistemas de asignación de méritos en el ámbito científico. Quienes evalúan las aportaciones de un investigador jamás lograrán la claridad de las estadísticas deportivas (series interminables de jugadas, goles y medallas), en parte porque la importancia de los errores científicos cambia con el tiempo a medida que se analizan sus implicaciones. En todo caso, merece la pena reflexionar acerca de métodos para reconocer y estimular la clase de saltos cualitativos que, aunque no satisfagan las expectativas originales, nos ayudan a seguir avanzando.

Cualquiera puede cometer errores. De hecho, el mero volumen de publicaciones científicas de nuestros días hace pensar que, probablemente, la mayoría de nosotros erramos durante la mayor parte del tiempo. Aún así, ciertas equivocaciones pueden resultar fecundas. Al mismo tiempo que intentamos hacerlo bien, detengámonos un momento para admirar el arte de estar productivamente equivocado.

PARA SABER MÁS

Bacterial viruses and sex. Max y Mary Bruce Delbrück en *Scientific American*, vol. 179, n.º 5, págs. 46-51, noviembre de 1948.
FLASH: A superluminal communicator based upon a new kind of quantum measurement. Nick Herbert en *Foundations of Physics*, vol. 12, n.º 12, págs. 1171-1179, 1982.
The life of a virus: Tobacco mosaic virus as an experimental model, 1930-1965. Angela Creager. University of Chicago Press, 2001.
Errors: Consequences of big mistakes in the natural and social sciences. Recopilado por Gerald Holton. Número especial de *Social Research*, vol. 72, primavera de 2005.
How the hippies saved physics: Science, counterculture, and the quantum revival. David Kaiser. W. W. Norton, 2011.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Superrefrigeradores térmicos

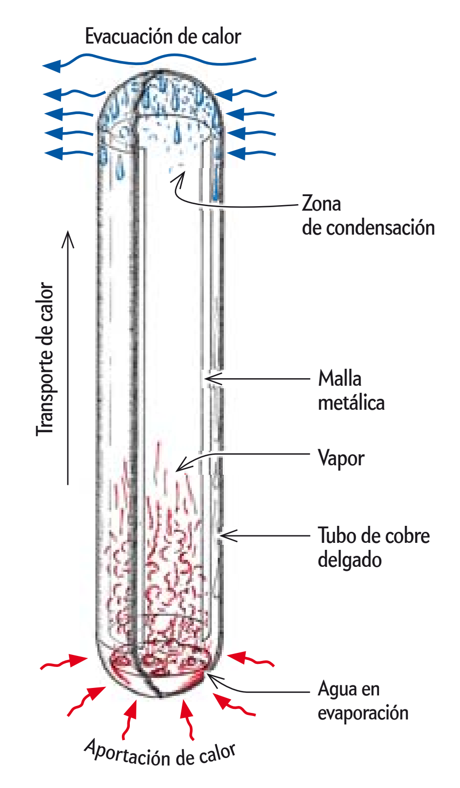
La cocina nos ofrece un espacio idóneo para la construcción de un tubo térmico, un dispositivo que transfiere el calor con gran eficacia

Mucho se ha hablado sobre los efectos positivos de una ingesta moderada de café. Este amargo brebaje nos despierta de la somnolencia y anima las tertulias. Bien poco puede añadir este humilde experimentador. Empero, menos se ha hablado de la temperatura óptima para ingerir la infusión de marras. Hay quien sorbe el café casi en ebullición, algunos lo templan con una dosis de leche y otros, sin duda, lo preferimos frío, o muy frío, pero nunca caliente.

Tradicionalmente, el problema de la alta temperatura de este cocimiento se ha resuelto con el concurso de unos cubitos de agua sólida: el típico café con hielo. Sin embargo, siento decirlo, me parece una solución a medias. Con este método de enfriamiento el café concentrado, el que puede cortarse con un cuchillo, se muda en quimera. Café con hielo es sinónimo de café aguado, y eso no gusta a muchos cafeteros. Pero ¿qué alternativa existe? ¿Cómo enfriar un café sin convertirlo en poco más que agua teñida? Alguien puede resolver el problema acudiendo al refrigerador casero. Perfecto. Pero enfriar el café en la nevera resulta tedioso y poco práctico en un bar, lugar donde suele servirse un café mejor que el de obtención casera. Resumiendo: ¿cómo podemos enfriar algo rápidamente sin disolverlo en agua fría?

Acudió a mi mente un sencillo artefacto que con cierta pomposidad se ha clasificado de superconductor térmico. Me refiero a los tubos térmicos (*heat pipes*). Este arreglo, propuesto en 1944, emula en lo básico al refrigerador de la cocina, con la ventaja de que no requiere motor alguno. Consta de un tubo metálico, a menudo de cobre, dentro del cual se ha practicado el vacío. En la zona dedicada a absorber calor hay cierto volumen de líquido, normalmente agua. Al calentar ese extremo, el líquido se evapora, robando calor del medio circundante. El vapor asciende hacia una zona fría, donde se condensa cediendo el calor que había tomado; una vez en estado líquido, regresa a la zona caliente, ya sea por la fuerza de la gravedad o por las de capilaridad, que corren a cargo de un tejido metálico que se dispone en la pared interior.

El dispositivo es sencillo, la física compleja y la realización práctica accesible. Tanto es así que hoy los tubos térmicos refrigeran nuestros ordenadores, satélites y un gran número de procesos industriales. Se construyen con un amplio abanico de materiales, adaptados en todos los casos al intervalo de temperaturas de servicio. Entre los fluidos de transporte destacan el sodio y una aleación de este con potasio; también se han llegado a utilizar mercurio y cobre —¡que funde a más de mil grados centígrados!—. Nosotros seremos más modestos: construiremos tubos térmicos con agua o metanol, líquidos útiles alrededor de la temperatura ambiente.



Tubo térmico seccionado.

Intentemos primero una construcción exploratoria. Tomemos un tubo de cobre de ocho o diez milímetros de diámetro y una longitud de trescientos milímetros. Busquemos en la ferretería un tapón exterior para el tubo, y en un comercio de material frigorífico una válvula de vacío para soldar. Necesitaremos también un retal de cable de antena de televisión, con la malla de tierra o masa en cobre, que extraeremos, y unos pocos centímetros cúbicos de agua destilada. Para empezar, limpiaremos a fondo todos los materiales y soldaremos con estaño los componentes. Con un soplete de butano soldaremos primero el tapón inferior; a continuación, introduciremos la malla del cable de antena y cortaremos el sobrante. Instalaremos luego la válvula de vacío. De esta desmontaremos el dardo con la junta tórica —de otro modo, podría resultar dañada— y la soldaremos. Por fin, introduciremos por la válvula dos o tres centímetros cúbicos de agua (operación fácil si se realiza con una jeringuilla). El siguiente paso, el más delicado: practicar el vacío en el interior del tubo.

Tomemos el tubo térmico con unas largas pinzas de cocina y, ya con el agua en su interior, calentémoslo suavemente sobre uno de los fuegos de la cocina; el tubo deberá permanecer ligeramente inclinado, con la válvula de vacío en la parte superior. Al poco observaremos que por esta escapa vapor a borbotones. Habrá llegado el momento de actuar con presteza y cerrar la válvula con su tapón, al mismo tiempo que retiramos el conjunto del fuego. Al hervir, el agua desplaza el aire, llenando todo el tubo con vapor. Al cerrar el tubo y descender la temperatura, el vapor condensa y, al convertirse en agua, disminuye su volumen de forma notabilísima. Resultado: en el tubo se produce un vacío parcial, limitado por la presión de vapor del agua de su interior.

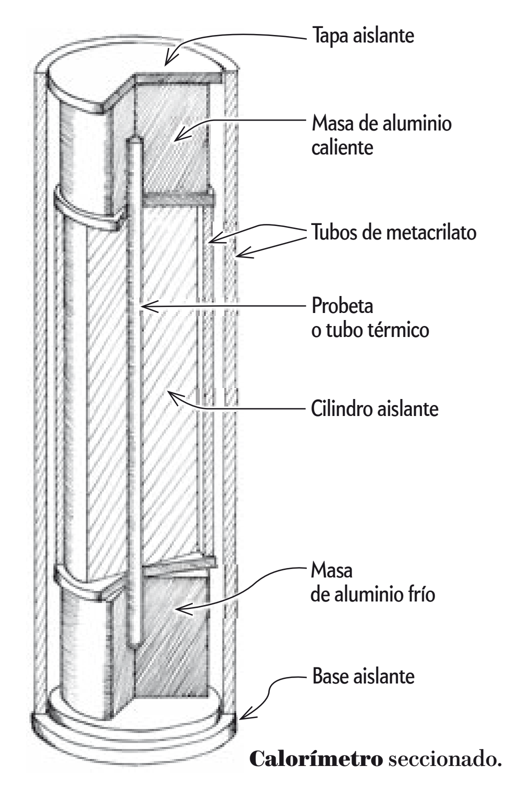
Distintos modelos de tubos térmicos: Tubo para captador solar (*a*), dos modelos con bulbo de vidrio (*b, c*), diseño curvo (*d*) y en forma de «U» (*e*), el prototipo utilizado para enfriar infusiones (*f*) y un tubo térmico refrigerado por agua (*g*).

Dejemos enfriar nuestro flamante tubo al aire, suavemente. Llegados a la temperatura ambiente, procederemos a un experimento exploratorio. Tomemos con nuestra mano y durante algunos minutos un extremo del tubo, permaneciendo este en posición vertical. Mientras, enrollemos en su extremo superior una capa de papel de cocina, bien adaptado y fijado, de ser necesario, con hilo bramante o de algodón. En pocos minutos, el tubo alcanzará la temperatura de nuestra mano y procederemos a mojar con alcohol el papel del extremo superior. Hecho esto, agitaremos el tubo como si de un abanico se tratara. En pocos segundos, percibiremos claramente que el tubo se enfría de forma espectacular (siempre y cuando el vacío sea suficiente). Si falla el experimento, repetiremos la operación de desalojo del aire, hasta adquirir la presteza necesaria. (Resulta increíble pensar en que, sin salir de la cocina, podemos pergeñar un artefacto capaz de romper algunas marcas.)

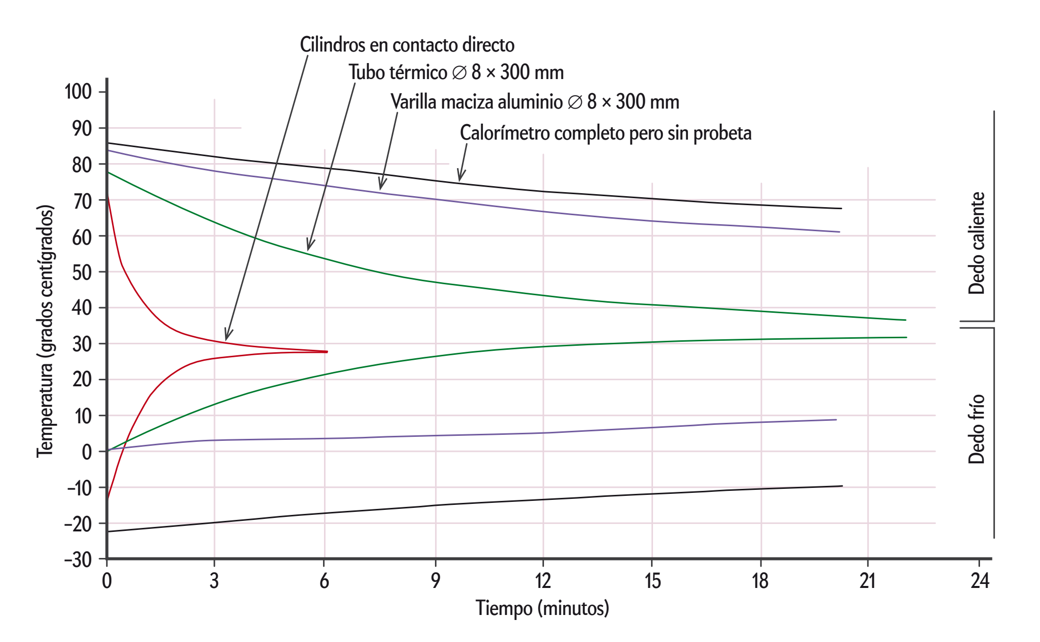
La magia de los tubos térmicos reside en que para el transporte de calor utilizan el cambio de estado de un fluido, agua en nuestro caso. Funcionan solo cuando entre los extremos existe una diferencia de temperatura notable y sostenida; ello hace que el agua llegue a hervir en la base del tubo y luego se condense en la parte superior, con lo que la transferencia térmica es muy eficaz. Cuando la diferencia de temperatura entre los extremos es de pocos grados centígrados, 5 o 6, el transporte por cambio de estado es muy reducido. Por tanto, si refrigeramos el extremo superior (frío) del tubo térmico con unas aletas y aire a temperatura ambiente (unos 20 ºC), el extremo inferior (caliente) deberá estar al menos a 30 ºC para situarse en condiciones de operación. Si calentamos la base por encima de esta temperatura, deberíamos poder percibir un transporte de calor especialmente elevado.

Una posible forma de verificación de la hipótesis anterior corresponde a la observación directa. Se me ocurrió, pues, construir un tubo térmico de cristal. Para ello utilicé una resistencia de acuario dotada de un buen tubo resistente al calor. Mediante una masilla epoxi para reparaciones de fontanería, acoplé un terminal de cobre en el extremo abierto, al que previamente había soldado la válvula, y practiqué el vacío con una pistola de aire caliente. Al sumergir el extremo de cristal en agua a 40 ºC se observaba en su interior una ebullición a borbotones, que cesaba rápidamente a menos que enfriase activamente el extremo superior de cobre. Había quedado demostrado: el aparato funcionaba con el extremo inferior a temperaturas muy poco por encima de los 30 ºC (dentro del tubo el agua hierve a menor temperatura que al aire libre).

Con la técnica más o menos a punto procedí a explorar las posibilidades de esos artefactos. Construí versiones con diversas aplicaciones. La primera: resolver el problema de la refrigeración del café. En efecto, el tubo térmico constituye un candidato perfecto para transportar el calor del café hasta el hielo sin terminar en un final aguado. Por estos lares, el cubito típico de hielo sitúa sus dimensiones en unos 45 milímetros de diámetro por



Calorímetro seccionado.



Gráfica comparativa del comportamiento térmico de los cilindros bajo distintas condiciones o conectados por distintos conductores térmicos.

una longitud similar. Su volumen es equiparable al de un *espresso* no demasiado corto, por lo que un solo cubito tiene capacidad más que suficiente para refrigerar un café hasta una temperatura suavemente fría. Si acoplamos en el extremo superior de un tubo térmico una copa con capacidad para contener un cubito y sumergimos el extremo inferior en el café, deberíamos enfriar este muy rápidamente y sin mediar soplido alguno.

Para mi dispositivo construí un tubo de 10 milímetros de diámetro, al que hice un engrosamiento en la base con el objetivo de facilitar el intercambio. Este bulbo terminal lo rellené parcialmente con granalla de cobre; luego con agua hasta la mitad. La parte superior la rematé con una copa de cobre, un manguito de cobre que forjé sobre un yunque hasta que pudo alojar en su interior un cubito. El resultado fue espectacular: el café se enfriaba en pocos minutos.

Un vasto campo de aplicaciones espera a ser descubierto. Refrigerar el tubo con agua del grifo permite templar cremas, caldos y sopas. Tubos largos, de más de un metro de longitud, permiten transportar fácilmente el calor captado del sol en una placa solar térmica, con rendimientos cercanos al 90 por ciento. También los he utilizado con éxito para enfriar rápidamente disoluciones de sales y acelerar así su cristalización.

Hasta aquí hemos dado por hecho que los tubos térmicos deben funcionar en posición vertical, de forma que el vapor sube, condensa y regresa a la base por gravedad. Sin embargo, ello no es totalmente cierto. Los tubos térmicos actuales operan incluso en posición invertida, debido a las intensas fuerzas de capilaridad que genera el material que recubre su pared interior. El modelo más básico dispone de una mecha de finísimo tejido de cobre, cosa que hemos emulado con la malla de tierra del cable de antena. Existen también recubrimientos sinterizados, hechos de diminutas bolitas de cobre, con una altísima porosidad y mínimos problemas de corrosión. Podemos ensayar un recubrimiento electrolítico, mediante la deposición de pequeños cristales de cobre, o intentar introducir unas mechas de fibra de vidrio. Todo ello redundará en una mayor eficacia, pero ¿cuánta?

Resolver la pregunta anterior requiere algo más que una observación de visu. Hay que construir un aparato de medida que nos permita evaluar científicamente las prestaciones de nuestro artefacto. Para ello opté por un aparato sencillo pero de gran aplicación, un calorímetro simplificado; asimismo, normalicé mis tubos térmicos de control a 8 milímetros de diámetro y 300 milímetros de longitud. Luego me procuré dos cilindros de aluminio de igual base y altura (69 milímetros), idéntico peso (685 gramos) y un taladro de ocho milímetros de ancho y 50 milímetros de longitud. A continuación, procedí a mecanizar un cilindro de madera de haya, que situé entre los cilindros de aluminio, así como unos tubos de metacrilato y unos discos de PVC, que se encargan de minimizar las corrientes convectivas y el intercambio térmico con el medio. Por fin, recubrí el conjunto con una coquilla de aluminio reflectante.

Con ese instrumento la operativa resulta bien sencilla: un cilindro de aluminio se introduce en el congelador; el otro, en agua hirviendo. Luego se arma el aparato y se introduce una sonda de termómetro en cada cilindro, justo hasta su centro. Y ya podemos empezar una fase de pruebas. La primera consistió en montar el instrumento sin ningún elemento de transporte de calor y observar cómo modificaban su temperatura los cilindros. En 20 minutos de medida, la temperatura del dedo frío pasó de –21 a –9,5 ºC, y la del caliente de 86,2 a 67,5 ºC; un intercambio de calor exasperadamente lento si lo comparamos con el que ocurre en los tubos térmicos, que completan el mismo proceso en un tiempo diez veces inferior.

Luego ensayé el comportamiento de una varilla de aluminio macizo (de las mismas dimensiones) y también el de los dos bloques en contacto directo, tanto en seco como con una película de agua interpuesta. La gráfica habla por sí misma. En un experimento típico, cuando las diferencias de temperatura aún son importantes, un tubo térmico casero es capaz de transportar hasta 60 julios por segundo, es decir, 60 vatios, o unas 14 calorías en el mismo tiempo. Podemos seguir investigando la relación entre rendimiento e inclinación o ensayar otros fluidos (incluso mezclas de agua y algún alcohol). De ahí que los tubos térmicos constituyan un recurso de primera magnitud para la transferencia de calor. Bien merecido tienen el apodo de «superconductores térmicos».

Los lectores pueden hallar ampliaciones de este experimento y contactar con el autor en el blog **Taller y Laboratorio 2.0** *www.investigacionyciencia.es/blogs*

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



El problema de la inducción de Hume

¿Es posible predecir el futuro? Una consecuencia sorprendente del axioma de elección

Todos razonamos sobre el futuro a partir de nuestras observaciones sobre el pasado. Cuando subimos a un avión, confiamos en que el aparato se elevará porque, en el pasado, una gran cantidad de aeronaves casi idénticas lo han hecho sin problemas en circunstancias muy similares. Cuando preparamos una taza de café, creemos que nos provocará la misma sensación placentera que en ocasiones anteriores. Todos estamos seguros de que mañana saldrá el sol. Nuestras expectativas acerca del futuro se basan en el método inductivo, según el cual tendemos a proyectar sobre el porvenir las regularidades que hemos observado en el pasado.

En el siglo XVIII, David Hume propuso un célebre argumento contra el método inductivo. Este partía de la siguiente pregunta: ¿cómo justificar la expectativa de que el método inductivo continuará generando predicciones mayoritariamente correctas en el futuro? Para demostrarlo cabrían dos posibilidades: a partir de un argumento deductivo, o bien mediante un razonamiento basado en nuestra experiencia previa con el método.

Pero parece claro que ningún argumento lógico o matemático podrá justificar el método inductivo: el mundo podría convertirse mañana en un lugar completamente caótico sin que ello contraviniese ningún principio lógico o matemático. Por tanto, si no podemos justificar el uso del método inductivo por medio de un argumento deductivo, tal vez podamos recurrir a nuestra experiencia con el método. Al fin y al cabo, el razonamiento inductivo nos ha brindado grandes servicios en el pasado. Nuestra experiencia confirma una y otra vez que el método genera predicciones certeras en la gran mayoría de los casos: el café casi siempre nos reconforta y el sol sale todas las mañanas. Por tanto, parece más que razonable concluir que continuará generando predicciones mayoritariamente correctas en el futuro.

Pero Hume no se hubiese dejado impresionar lo más mínimo por el razonamiento anterior. Después de todo, no hemos hecho sino emplear el método inductivo para justificar el propio método. Podemos ilustrar el inconveniente con un ejemplo. Supongamos que existe una comunidad de individuos que, a la hora de razonar sobre el futuro, utilizan el método *contrainductivo*: si observan una determinada regularidad en el mundo, predicen que dicha pauta se esfumará en el futuro. (Esta manera de razonar no se diferencia demasiado de la que emplea un jugador empedernido que se halla convencido de que comenzará a ganar muy pronto porque ya lleva muchísimo tiempo perdiendo todo el dinero que apuesta.)

La vida en la comunidad contrainductivista se halla plagada de dificultades. La manera de razonar de sus miembros les lleva a tomar decisiones descabelladas. Dado que nadie ha sobrevivido tras lanzarse por un barranco, están convencidos de que sobrevivirán cuando lo intenten. Pero, por disparatado que parezca el método contrainductivo, siempre podríamos justificarlo si —como en el caso anterior— para ello se nos permitiese recurrir al propio método: dado que la mayoría de las predicciones generadas por el método contrainductivo han sido erróneas, razonan los miembros de la comunidad, a partir de ahora el método generará predicciones mayoritariamente correctas.

El problema de la inducción de Hume sugiere la siguiente pregunta: ¿existe alguna estrategia para predecir el futuro que nos permita justificar la expectativa de que sus predicciones se cumplirán la mayoría de las veces? Hume creía que el método inductivo no satisfacía dicho requisito. Y, en líneas generales, dudaba que existiese un método tal.

¿Cara o cruz?

A pesar del pesimismo de Hume, uno de los axiomas de la teoría de conjuntos, el *axioma de elección*, parece implicar que, al menos en ciertas circunstancias idealizadas, sí resulta posible predecir el futuro. A continuación examinaremos dos ejemplos. El primero consiste en un juego en el que habremos de realizar un número infinito de predicciones en el intervalo de una hora. (Este caso posee una estructura parecida al que Agustín Rayo planteaba en «Sombreros infinitos» [Investigación y Ciencia, febrero de 2009]. Sin embargo, aquí analizaremos una solución alternativa que nos permitirá efectuar una generalización sorprendente.)

Imagine que, a partir de las 12:00 del mediodía, lanzamos una moneda al aire cada $1/n$ de hora, para cada número natural n. Los lanzamientos (idealizados y de duración cero cada uno) se realizarán de tal manera que el último de ellos tenga lugar a las 13:00 (correspondiente a $n = 1$); el penúltimo, a las 12:30 ($n = 2$); el antepenúltimo, a las 12:15 ($n = 3$), etcétera. Observe que, de esta manera, a cada ronda precede un número infinito de ellas.

Justo antes de cada lanzamiento, nuestro objetivo consiste en predecir si obtendremos una cara o una cruz. Podemos suponer que la probabilidad de obtener un resultado u otro es completamente independiente de lo que haya ocurrido en los lanzamientos anteriores. Además, sabemos que la probabilidad de obtener una



cara o una cruz es siempre igual a 1/2. ¿Existirá algún método que nos permita predecir de manera fiable el resultado de la mayoría de los lanzamientos?

Desde luego, la tarea parece imposible. Es cierto que, cuando nos toque predecir el resultado del lanzamiento de las 12:15, dispondremos de la lista infinita de todos los resultados obtenidos hasta entonces. Pero dado que la probabilidad de obtener una cara o una cruz no depende de las rondas anteriores, no parece que estas puedan ayudarnos a predecir qué ocurrirá a las 12:15.

Por increíble que parezca, existe una estrategia que garantiza que, a lo sumo, nuestras predicciones fallarán en un número *finito* de ocasiones. Para describirla, lo primero que debemos hacer es dar una caracterización matemática a la secuencia de lanzamientos: cada vez que la moneda caiga cara, codificaremos el resultado con un 0; cuando caiga cruz, con un 1. De esta manera, una secuencia de lanzamientos queda representada por una sucesión infinita de ceros y unos, en la que el término n-ésimo se corresponde con el resultado del lanzamiento que tuvo lugar un $1/n$ de hora después de las 12:00. Así, una sucesión como la siguiente:

$$\langle 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, \ldots \rangle$$

codificaría una secuencia de lanzamientos que concluyó con una cara a las 13:00, una cruz a las 12:30, otra cruz a las 12:15, tres caras en los lanzamientos anteriores, cuatro cruces en los precedentes, etcétera.

El conjunto de todas las sucesiones infinitas de ceros y unos se corresponde con la familia de todos los resultados que podemos obtener tras haber efectuado todos los lanzamientos. Ahora bien, el axioma de elección de la teoría de conjuntos garantiza que siempre es posible *ordenar bien* cualquier conjunto. En general, que exista un *buen orden* en un conjunto quiere decir que hay una manera de ordenar sus elementos de modo que, dado cualquier subconjunto suyo, siempre existirá en él un primer elemento.

Es importante señalar que no toda manera de ordenar un conjunto da lugar a un buen orden. Sin ir más lejos, el orden canónico de los números reales no constituye una relación de buen orden en los reales. Para verlo, basta con tomar un intervalo abierto como (0, 1) (todo número real estrictamente mayor que 0 y estrictamente menor que 1): dado cualquier número real en dicho intervalo, siempre será posible encontrar un número menor que él de acuerdo con el orden canónico. Por tanto, no podemos decir que exista un «primer elemento» en (0, 1) de acuerdo con el orden canónico.

Ahora bien, del axioma de elección se sigue que existe un buen orden de los reales, según el cual, dado cualquier subconjunto de números reales siempre existirá en él un número menor que todos los demás. Eso sí, el axioma no nos dice cómo ordenar bien los números reales; tan solo nos dice que es posible hacerlo.

Del mismo modo, y aunque en principio ignoremos cómo construirla, sabemos que existe una manera de ordenar bien el conjunto formado por todas las sucesiones infinitas de ceros y unos. Denotemos cada una de esas sucesiones mediante el símbolo S_k (donde k es un número natural) y —suponiendo que podamos fijarla— llamemos $\prec$ a la relación de buen orden en dicho conjunto. En particular, dado que $\prec$ es un buen orden del conjunto formado por todas las S_k, sabemos que no puede existir una cadena infinita descendente como la que sigue:

$$\cdots \prec S_3 \prec S_2 \prec S_1,$$

puesto que entonces no habría ningún primer elemento.

Ahora ya podemos diseñar una estrategia que nos permita predecir con acierto la mayoría de los lanzamientos de moneda.

Para ello, antes de las 12:00 escogeremos un buen orden $\prec$ en el conjunto de sucesiones de ceros y unos. Cuando llegue el momento de predecir el resultado del lanzamiento que tiene lugar un $1/n$ de hora después de las 12:00, procederemos en tres pasos. Primero, nos fijaremos en todas las sucesiones de ceros y unos que resulten compatibles con los resultados que hemos obtenido hasta entonces (es decir, en aquellas cuyos términos posteriores al n-ésimo se corresponden con las caras y las cruces obtenidas en los lanzamientos de moneda anteriores). Segundo, de entre todas esas sucesiones, seleccionaremos la *menor* de

DANIEL UZQUIANO

ellas de acuerdo con el buen orden prefijado, $\prec$. Por último, predeciremos el resultado del lanzamiento de moneda de acuerdo con la regla siguiente: si en el n-ésimo término de la sucesión seleccionada es un 0, pronosticaremos una cara; si es un 1, vaticinaremos que la moneda caerá cruz. Si procedemos de esta manera para cada lanzamiento después de las 12:00, nos habremos equivocado, a lo sumo, un número finito de veces.

¿Cómo es posible? Podemos demostrarlo por reducción al absurdo. Supongamos en primer lugar que nos hemos equivocado en las predicciones correspondientes a los lanzamientos efectuados un $1/p$ y un $1/q$ de hora después de las 12:00, donde p es un número natural menor que q (lo que implica que el lanzamiento asociado a q tuvo lugar antes que el asociado a p). Denotemos por S_p y S_q las sucesiones que empleamos en cada momento para realizar cada predicción incorrecta. En tal caso, sabemos que $S_p \neq S_q$, ya que, por definición, S_p incluye el valor correcto del lanzamiento de la moneda en el lugar q-ésimo de la sucesión, mientras que S_q no, pues su predicción falló. Pero, además, sabemos que:

$$S_q \prec S_p,$$

pues, de otro modo, el método no habría recomendado usar S_q a la hora de predecir el valor obtenido un $1/q$ de hora después de las 12:00.

Se sigue de lo anterior que no podemos haber errado un número infinito de veces. ¿Por qué? Porque si la estrategia hubiese generado un valor equivocado para un conjunto infinito de lanzamientos correspondientes a las posiciones k_1, k_2, k_3, ..., aplicando repetidamente el mismo razonamiento anterior podríamos demostrar que:

$$\cdots \prec S_{k_3} \prec S_{k_2} \prec S_{k_1}.$$

Ello implicaría que existe una cadena infinita descendente de sucesiones de ceros y unos con respecto al orden prefijado. Pero semejante conclusión contradice el supuesto de que $\prec$ es un buen orden del conjunto de sucesiones, por lo que podemos concluir que el método jamás producirá un número infinito de predicciones.

Historias y mundos

Existen más estrategias que garantizan el resultado anterior. Sin embargo, el método descrito permite una curiosa generalización. Pensemos en una *historia* como en una función que asigna a cada instante de tiempo un estado del mundo. Es decir, una función de $\mathbb{R}$ a $\mathbb{R}$, donde cada instante queda representado por un número real, y cada estado posible del mundo, por otro número real.

Una de esas funciones, que podemos llamar H_R, codifica la historia del mundo *real*, aquel en el que vivimos. El resto de las funciones describen otras historias, correspondientes a otros mundos posibles. Una formulación idealizada del problema de la inducción vendría a ser la siguiente: ¿existe alguna estrategia que nos permita predecir acertadamente el valor de $H_R(t)$ para la mayoría de los instantes de tiempo t? Curiosamente, también aquí el axioma de elección asegura la existencia de una estrategia tal. Esta se obtiene generalizando el método del problema anterior.

Supongamos que conocemos los valores que la función H_R asocia a cada instante previo a t. Conocidos esos datos, nuestro objetivo consiste en predecir qué ocurrirá en t. Para ello, en primer lugar fijaremos un buen orden $\prec$ en el conjunto de todas las historias posibles (al igual que antes, la existencia de ese buen orden queda garantizada por el axioma de elección). De entre todas ellas, escogeremos las que resultan compatibles con los valores de H_R anteriores a t. Por último, seleccionaremos la menor de ellas de acuerdo con la relación de buen orden que habíamos fijado.

Ya contamos con todo lo que necesitamos: ahora, podemos predecir que el estado del mundo en el instante t coincidirá con el valor que la función seleccionada asocia a t. Al igual que antes, nada nos garantiza que no vayamos a cometer errores. Sin embargo, resulta posible demostrar que, en un sentido muy preciso, la *mayoría* de nuestras predicciones serán acertadas.

Como antes, la clave consiste en establecer una conexión entre el orden de los instantes en los que el método erró y las historias empleadas para predecir el estado del mundo en cada uno de ellos. En primer lugar, notemos que si t y t' denotan dos instantes en los que el método se equivocó (donde $t' > t$ de acuerdo con el orden canónico de los reales) y h y h' son las historias que empleamos para realizar las correspondientes predicciones, entonces sabemos que $h \prec h'$.

Ahora consideremos el conjunto formado por todos los instantes en los que nos hemos equivocado (E) y el de las historias que hemos utilizado para efectuar cada una de las predicciones erróneas (H^*). A partir de la observación del párrafo anterior, podemos concluir que el orden prefijado $\prec$ ordena el conjunto de historias en H^* de la misma manera en que el orden canónico de los reales $<$ ordena el conjunto de instantes E. Pero, dado que $\prec$ constituye un buen orden en H^*, se sigue que el orden canónico de los números reales debe ordenar bien el subconjunto E.

Ahora bien, sabemos que si un conjunto de números reales se encuentra bien ordenado por medio del orden canónico, entonces dicho conjunto solo puede ser, a lo sumo, tan grande como el conjunto de los números naturales. De ello se sigue que el conjunto de instantes E para los que obtuvimos una predicción equivocada no puede ser mayor que el conjunto de los números naturales; el cual, dentro de los reales, es un conjunto de medida cero (lo que sugiere que la probabilidad de equivocarnos si utilizamos el método anterior es prácticamente nula).

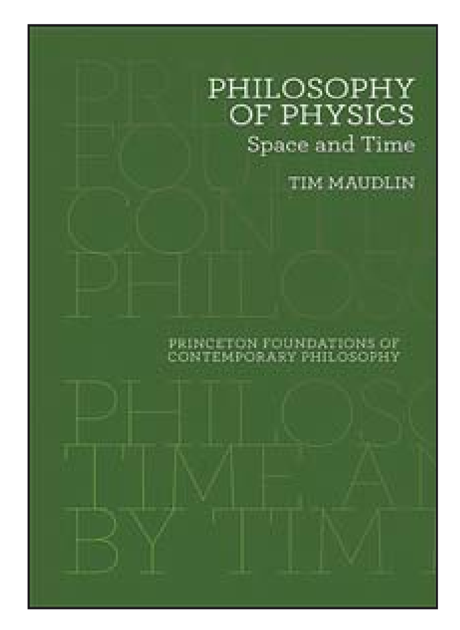
Que la medida del conjunto de errores sea nula nos permite afirmar que el *tamaño* del conjunto de instantes en los que hemos errado resulta insignificante en comparación con el del conjunto de aciertos. En otras palabras, podemos asegurar que nuestro método nos garantiza que acertaremos «casi siempre» en nuestras predicciones sobre el futuro.

El resultado que hemos descrito se debe a Christopher Hardin y Alan Taylor, quienes llegaron a él generalizando la solución de problemas parecidos a nuestro primer ejemplo. Sin embargo, tal y como ellos mismos aclaran en su artículo, se trata de un resultado puramente matemático que no ofrece ninguna estrategia factible para predecir el futuro. Que exista un método idealizado con las características descritas por Hardin y Taylor no significa que podamos acceder a él; para ello, deberíamos hallarnos en condiciones de fijar un buen orden en el conjunto de funciones que asocian números reales a números reales. Y aunque el axioma de elección implica que existen modos de «ordenar bien» un conjunto, no nos dice cómo encontrar uno.

Lamentablemente, si lo que queríamos era hallar una respuesta satisfactoria al problema de la inducción de Hume, deberemos buscar en otra parte.

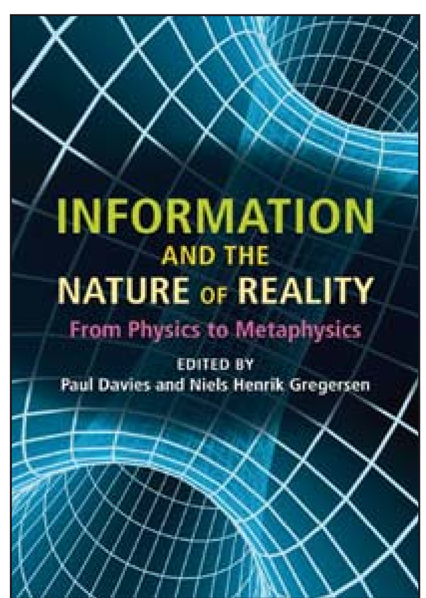
PARA SABER MÁS

El artículo de Hardin y Taylor, **A peculiar connection between the axiom of choice and predicting the future**, apareció en *American Mathematical Monthly*, vol. 115, n.º 2, págs. 91-96 en febrero de 2008.



PHILOSOPHY OF PHYSICS: SPACE AND TIME,

por Tim Maudlin. Princeton Foundations of Contemporary Philosophy, Princeton University Press; Princeton y Oxford, 2012.



INFORMATION AND THE NATURE OF REALITY. FROM PHYSICS TO METAPHYSICS,

dirigido por Paul Davies y Niels Henrik Gregersen. Cambridge University Press; Cambridge, 2010.

Entre la física y la filosofía

Espacio, tiempo, información

Uno de los atractivos que hacen la física tan fascinante, más allá de sus contenidos especializados, es su contacto con las fronteras de la filosofía: además de una descripción matemática de la naturaleza, ofrece una reflexión sobre muchos conceptos básicos con que nos representamos la realidad (espacio, tiempo, materia, causa, energía, origen, cosmos, etcétera). Los dos libros que comentamos constituyen excelentes ejemplos de exploración de aspectos filosóficos suscitados por la física: en relación a los conceptos de espacio y tiempo, en uno, y de información, en el otro. Son dos obras muy diferentes, pero que tienen el común denominador de analizar las fronteras mencionadas.

Espacio y tiempo

El primer libro ofrece una introducción a cuestiones filosóficas sobre el espacio y el tiempo, dirigida a no especialistas en física, pero cuya lectura resulta ideal para los físicos interesados en las bases conceptuales de esta especialidad científica. El autor, Tim Maudlin, es profesor de filosofía en la Universidad de Nueva York; entre sus obras figuran títulos como *The metaphysics within physics* y *Quantum non-locality and relativity*, lo que pone de manifiesto su experiencia y dedicación al estudio y presentación de las numerosas y potentes imbricaciones entre la física y la filosofía. Esa experiencia se nota en el libro, que es considerablemente didáctico, bien motivado, y que desprende un conocimiento amplio de los temas tratados, en sus vertientes física, histórica y filosófica.

La obra de Maudlin consta de siete capítulos. Los tres primeros están dedicados a las interpretaciones clásicas del tiempo y el espacio (Aristóteles, Galileo, Newton, Leibniz). Los capítulos cuatro y cinco analizan el espaciotiempo de la relatividad especial; el sexto trata la geometrización del espaciotiempo en la relatividad general, y el último está dedicado a la dirección y topología del tiempo. Echo en falta un capítulo relacionado con la física cuántica, que aborde las consecuencias de la no-localidad cuántica o de la posibilidad de fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo y su estructura espumosa a escalas del orden de la longitud de Planck —pero ello no entraba en los planes del autor.

La obra, puramente cualitativa, es aguda y profunda en sus análisis, y bastante clara en su exposición —salvo algunos párrafos, de vez en cuando, que requieren un esfuerzo de atención más concentrado—. El autor inicia su análisis de las conceptualizaciones clásicas del espacio y el tiempo con Aristóteles. En contraste con la visión excesivamente simplificada y caricaturesca que los físicos actuales suelen tener de la física aristotélica, las breves explicaciones de Maudlin ponen en relieve la potente construcción intelectual que esta representa. El espacio aristotélico es esférico y tiene un centro. Ello permite distinguir entre movimientos naturales, espontáneos, y movimientos forzados, en los que intervienen fuerzas que producen desviaciones respecto de los movimientos naturales. Estos se producen como resultado de la tendencia de los diversos elementos a ocupar su lugar natural: la tierra y el agua, hacia el centro; el aire y el fuego, hacia arriba; está además el éter, que describe una rotación incesante manifestada en el movimiento de las estrellas. La geometría y el movimiento natural están, pues, ligados íntimamente y de forma intuitiva y sugerente. No es extraño que cambiar el modelo resultara muy difícil.

Con Galileo y Newton, la geometrización del espacio cambia profundamente. De hecho, la inercia galileana todavía conserva el movimiento de rotación alrededor de la Tierra como un movimiento inerte natural: en ausencia de fuerzas tangenciales, un objeto sobre la Tierra tiende a conservar su movimiento relativo respecto de la superficie de esta. Fue Descartes —cuya contribución prácticamente no se menciona en el libro, como ocurre con excesiva frecuencia en los estudios anglosajones— quien sugirió la posibilidad de movimientos rectilíneos indefinidos. Para Newton, el espacio es infinito, homogéneo, isótropo.

Maudlin distingue diversos aspectos geométricos del espacio físico: una topología, una estructura afín, y una métrica —entre la topología y la estructura afín se puede incluir la diferenciabilidad—, y su papel en la consideración del espacio. Analiza detalladamente la formulación

de la primera ley de Newton y las diferencias entre movimiento absoluto y movimiento relativo. Tanto para Newton como para Galileo, el movimiento rectilíneo absoluto no es detectable, sino solo el relativo; sin embargo, para Newton puede existir un movimiento absoluto —pero no cognoscible—, mientras que Galileo no se plantea tal movimiento. Las dificultades conceptuales de la posibilidad de un movimiento absoluto no detectable se ilustran mediante la discusión metafísico-teológica de Leibniz y Clarke, en el marco de los principios leibnizianos de razón suficiente y de identidad de lo indistinguible.

El paso siguiente corresponde a la transición del espacio galileano-newtoniano al espaciotiempo de Einstein y Minkowski. La foliación del espaciotiempo en planos temporales paralelos inducida por la simultaneidad en el caso clásico es reemplazada por la foliación en conos de luz en el espacio minkowskiano. Por otro lado, como la relatividad es un postulado sobre la estructura del espaciotiempo, pero la geometría de este no es directamente perceptible, el postulado deviene operativo empíricamente tan solo a través de leyes que describen el comportamiento de sistemas perceptibles. El autor analiza la función que cumplen en la especificación de la geometría los rayos de luz, los objetos masivos inerciales y los relojes.

La relatividad general supone el paso del espaciotiempo plano de Minkowski a un espaciotiempo curvado —no de un espacio euclídeo newtoniano a un espacio curvado, como se acostumbra a creer—. Así, no se curva tan solo el espacio, sino también el tiempo. Precisamente, el último capítulo está dedicado a la geometría del tiempo en relatividad general y a la discusión de la posibilidad de viajes en el tiempo.

Información

El segundo libro corresponde a una colección de quince contribuciones breves de otros tantos autores sobre aspectos diversos del concepto de información, agrupadas en cuatro grandes secciones: historia, física, biología, y filosofía y teología. Desde su introducción en la teoría de comunicaciones por Shannon en 1945, el concepto de información ha ido ganando presencia en diversos campos científicos: en la informática, en el tratamiento, transmisión y almacenamiento de datos, en las telecomunicaciones, en la biología molecular y la genética, en la neurobiología, en la evolución, en la termodinámica, en la física cuántica, en la sociología... Asimismo, el impulso recibido desde las ciencias ha dado nueva vitalidad al concepto de información en filosofía, teología y ética. Eso último no debe sorprender, ya que el concepto de información posee una honda raíz filosófica, como «dar forma», próxima a la idea de creación.

Tras una breve presentación de los coordinadores del libro, Paul Davies (Universidad estatal de Arizona) y Niels Henrik Gregersen (Universidad de Copenhague), el libro comienza con dos artículos de E. McMullin y P. Clayton, respectivamente, sobre la materia en la historia de la filosofía y en la física contemporánea. Comparan una visión del mundo puramente basada en la materia y la energía con otra en que también intervenga la información, que permite nuevas sutilezas. En efecto, la visión clásica materialista y mecanicista de la realidad ha resultado ser clamorosamente insuficiente para captar los desarrollos modernos de la física cuántica y la biología molecular.

El tratamiento cuántico de la información, en contraste con su tratamiento puramente clásico, ofrece grandes sorpresas conceptuales y —en potencia— también prácticas, por las posibilidades del tratamiento masivo de información en paralelo. Su desarrollo constituye uno de los campos de moda en la física cuántica, y permite aprovechar las propiedades más sutiles de la función de onda —sobre todo la superposición y el entrelazamiento—. Tres autores (P. Davies, S. LLoyd y H. Stapp) reflexionan sobre la visión computacional del universo y de la mente. El universo considerado como un inmenso ordenador cuántico que se calcula a sí mismo; la información como concepto que interviene en la relación entre observador y mundo, y que forma parte de la consciencia...

El papel de la información en biología es examinado por cinco autores (J. Maynard Smith, T. W. Deacon, B.-O. Küppers, J. Hoffmeyer, H. Rolston), en sus posibilidades y en sus deficiencias, y comparado con la comunicación entre seres vivos y la semiótica de la vida. La célula es considerada, hoy, en la época de la secuenciación genética masiva, en la época del estudio informático del genoma y del proteoma, como un superordenador que procesa y replica información. ¿Puede describirse la evolución en términos de un emergentismo informacional basado en las ciencias de la complejidad? En lo que respecta al cerebro, ¿proporciona el uso de conceptos de información visiones realmente nuevas sobre el tema clásico de la mente y el cerebro?

Otros cinco autores (A. Peacocke, K. Ward, J. F. Haught, N. H. Gregersen y M. Welker) tratan las consecuencias de los nuevos recursos del concepto de información. ¿Cómo se pasa de la información al significado? ¿Abre el concepto de información nuevos caminos a la teología? ¿Son anteriores las matemáticas a las leyes de la física y estas anteriores a la información, o bien —como propone Davies— podríamos pensar en la información como más fundamental que las leyes físicas y que las matemáticas? ¿Es Dios el principio informacional último en un universo que se autodesarrolla evolutivamente, la realidad ontológica primaria? ¿Qué aporta la información a la reflexión teológica sobre la cosmología? ¿Qué tiene que ver la información con el Espíritu?

Comentario final

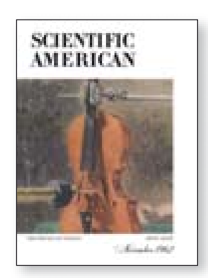
En definitiva, ambos libros ofrecen una muestra excelente del estímulo intelectual de primer orden que puede suponer la reflexión sobre los resultados de la física y sobre su estructura de conocimiento. Algo aparentemente tan inmediato como el espacio se convierte —en la física y en la filosofía— en una auténtica aventura intelectual.

Habría resultado interesante dar la palabra a algunos filósofos sobre el espacio y el tiempo, aunque fuera de forma muy sintética, para hacer del libro un puente de doble sentido entre la física y la filosofía, en lugar de una pasarela por la que los interesados en la filosofía pueden llegar a consideraciones físicas elaboradas. La segunda obra reseñada, sobre la información y la naturaleza de la realidad, resulta, en ese aspecto, más equilibrada, ya que da voz a científicos y filósofos.

En ambos trabajos, la física es vista no tanto como una teoría del todo, como una respuesta global a la realidad, sino como una fuente de nuevas preguntas, sorprendentes, agudas, sobre la realidad, sea esta lo que sea.

—David Jou
Universidad Autónoma de Barcelona

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Noviembre 1962

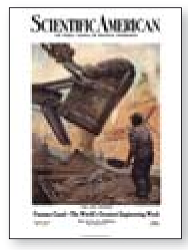
Socialmente desvalidos

«Las investigaciones sobre el desarrollo emocional de nuestros sujetos de estudio surgieron a raíz de los esfuerzos para crear y mantener una colonia de animales jóvenes, vigorosos y libres de enfermedades que se pudieran emplear en diversos programas científicos. Al separarlos de su madre a las pocas horas de nacer y someterlos a un régimen de alimentación y atención física más controlado, conseguimos una tasa de supervivencia más alta, al tiempo que podíamos separar, sin protestas maternales, los animales elegidos para el ensayo. No fue hasta después cuando nos dimos cuenta de que los simios, aunque vigorosos y carentes de patologías, sufrían un trastorno emocional.

—Harry F. Harlow
y Margaret Kuenne Harlow.»

Violines de hoy

«La perfeccionada ciencia de la acústica es aplicable al conocimiento, estudio y fabricación de violines. Sin marginar el precioso legado de los siglos, el constructor de violines debería adquirir un mayor conocimiento científico sobre sus instrumentos, mientras que los físicos de la acústica deberían reconocer en ello un auténtico reto para su disciplina. Realmente deberíamos aprender cómo construir unos instrumentos en general mejores que los que construyeron los antiguos maestros. Si ese reto no pudiera superarse, podríamos al menos averiguar las causas de nuestras limitaciones.»



Noviembre 1912

El Canal de Panamá

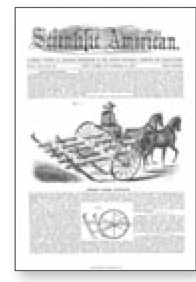
«¿Estiramos demasiado el argumento al decir que la conquista del istmo de Panamá es una hazaña lograda con las armas de la paz, tan brillante y tan ardua como cualquiera de las jamás logradas por las armas de la guerra? El hecho de que el canal vaya a quedar listo para el tráfico un año antes de la fecha prevista revela lo acertado y eficaz de la actuación del ejército en la ejecución de la mayor obra de ingeniería del mundo.»

El Canal de Panamá se inauguró oficialmente casi dos años después, el 15 de agosto de 1914.

El hidroavión de Curtiss

«No resulta difícil entender por qué una capa de agua constituye un aeródromo ideal. El aviador, al salir, no debe ajustarse a un recorrido dado y siempre puede poner proa al viento. Y, en suma, es mucho más fácil y seguro despegar y posarse sobre agua. El nuevo hidroavión de canoa ofrece las ventajas propias de una embarcación gracias a su flotabilidad, navegabilidad y protección para los aviadores. El hidroavión cabalga sobre un mar encrespado, sea propulsado o a la deriva, como cualquier embarcación motorizada de su tamaño, y vuela igual de bien que cualquier aeroplano de las mismas proporciones; por ello, la combinación ofrece las ventajas de la barca motora y del aeroplano. No hay límites para el desarrollo de este tipo de máquinas.

—Glenn Curtiss»



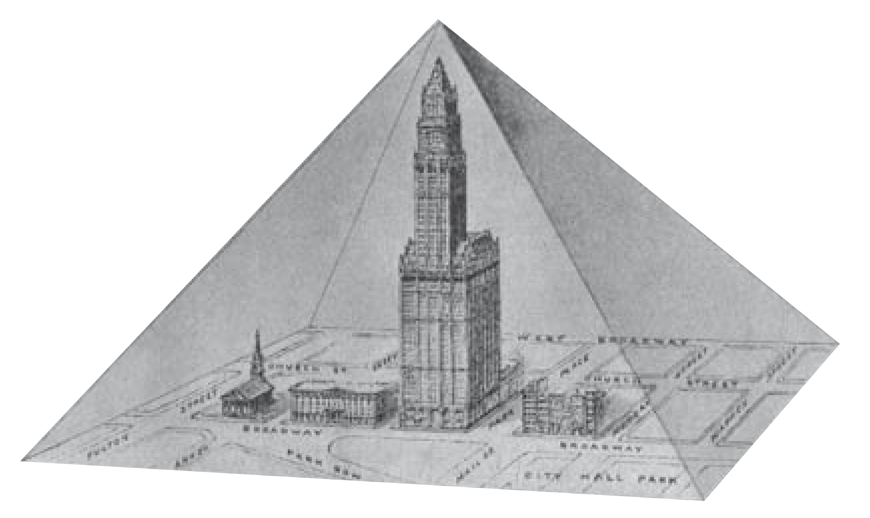
Noviembre 1862

Plásticos para juguetes

«Entre los variados productos de esa maravillosa sustancia (el caucho vulcanizado) se ha desarrollado un nuevo arte americano aplicado a la fabricación de juguetes elásticos. De estos se producen toneladas al año en la factoría de Wiccopee, ubicada en el Fishkill, junto a Matteawan (Nueva York). En todos los aspectos que podamos imaginar poseen la misma calidad, por cierto excelente, que los antiguos juguetes alemanes. Muchas de las muñecas parecen estar vestidas de terciopelo y tela de lana fina. Pero esas ropas están confeccionadas con caucho; las imitaciones del terciopelo y del tejido se han logrado espolvoreando seda y borra sobre las piezas, las cuales se preparan con un barniz especial para hacer que las partículas se adhieran.»

Elecciones

«Desde la ventana de nuestra oficina, en el parque del Ayuntamiento, se avista el puesto de reclutamiento del capitán Hogan, un valiente combatiente irlandés que mandó una batería durante la batalla de los siete días ante Richmond. Conocimos al capitán la otra mañana durante su turno de servicio y le preguntamos qué tal le iba con el reclutamiento. "Mal", replicó, y adujo como una de las causas principales que los políticos de ambos partidos dificultaban el alistamiento por temor a que algunos de sus seguidores pudieran partir a la guerra antes de las elecciones. Según el capitán, esos miserables sujetos venderían a San Pablo y a todos los apóstoles con tal de conseguir un cargo.»



Dos años antes de la inauguración del Canal de Panamá, solo en el Corte Culebra (la principal excavación) ya se habían extraído 15 millones de metros cúbicos de piedra y tierra, suficientes para construir una pirámide de 263 metros de altura (la cual habría dado cabida al rascacielos más alto de la época, el Edificio Woolworth), 1912.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVII, N.º 10, 7 DE SEPTIEMBRE DE 1912




El estado de la ciencia en el mundo
John Sexton

De la universidad a la empresa. El éxito alemán
Stefan Theil

Países sobresalientes
La redacción

¿Puede China seguir en ascenso?
Philip G. Altbach y Qi Wang

Premiar la productividad para atraer el talento
Paula Stephan

La cultura de la creatividad
Entrevista a Paul Nurse, por Fred Guterl



COSMOLOGÍA

Una ventana al primer instante del universo

Daniel G. Figueroa y Juan García-Bellido

Poco después de la gran explosión se generó un fondo de ondas gravitacionales que aún hoy permea el universo. Su detección permitiría observar cómo era el cosmos una fracción de segundo después de su origen.

NEUROCIENCIA

El lenguaje del cerebro

Terry Sejnowski y Tobi Delbruck

El cerebro da sentido a nuestras experiencias mediante la sincronización de los impulsos que recorren miles de millones de células nerviosas.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Lorenzo: *Superhumanidad*; Luis Bou: *¿Seremos cada vez más inteligentes?, Delitos oníricos, Mover con la mente, Errores fecundos y Viajero del tiempo*; Andrés Martínez: *Cumplir los cien años*; Bruno Moreno: *Preguntas para el próximo millón de años, Apuntes y De cerca*; Fabio Teixidó: *El gran experimento climático*; Alberto Ramos: *Más allá del horizonte cuántico*; Mari Carmen Bañuls: *Objetivos y oportunidades de la simulación cuántica*; Juan Pedro Adrados: *El vertedero de la era espacial*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España